

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA POLITÈCNICA SUPERIOR DE ALCOY



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

CAMPUS D'ALCOI

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

**“Diseño de una planta de incineración de residuos sólidos
urbanos para las comarcas de l’Alcoià y el Comtat”**

Autor:

Clara Cardenal Miró

Dirigido por:

Dr. Vicent Fombuena Borràs

Julio 2020

RESUMEN

Este documento realiza un estudio sobre la implantación y el diseño de una planta incineradora de residuos sólidos urbanos en las comarcas de l'Alcoià y el Comtat. Se puede dividir en tres partes fundamentales, en la primera, la introductoria, se establece el marco teórico de la incineración de residuos, además se exponen conceptos como economía circular, revalorización de residuos o el 'Waste to Energy', los cuales serán clave para el desarrollo de este proyecto. Dentro de esta misma parte también se hablará sobre el proceso de incineración de residuos, cómo se desarrolla, que tecnologías se pueden usar y cuáles son las más convenientes en cada caso.

Una vez conocido el funcionamiento de una planta incineradora de RSU, se procederá al desarrollo del proyecto. El objetivo principal del estudio es el de la creación de una planta incineradora capaz de tratar 49.000 toneladas de residuos anuales, procedentes de 137.289 habitantes. Para ello se elegirá el terreno donde se situará la planta y se mostrarán las distintas tecnologías utilizadas. Dentro de esta segunda parte se encontrarán también todos los cálculos realizados para el correcto funcionamiento del sistema.

Finalmente, se realizará un estudio económico del proyecto final, obteniendo así el coste de la inversión total, 4.244.849 €, y el coste de tratar una tonelada de residuos en la planta en cuestión, 16,42 €. En este último apartado se estudiará también la viabilidad de este.

SUMMARY

“Design of a solid urban waste incineration plant for the regions of l'Alcoià and el Comtat”

This document makes a study on the implementation and design of a solid urban waste incinerator plant in the regions of l'Alcoià and el Comtat. It is divided into three main parts. In the first one, the introduction, the theoretical framework of waste incineration is established, and concepts such as circular economy, waste revaluation, or 'Waste to Energy' are presented, these ones will be key to the development of this project. Within this same part, the process of waste incineration will also be discussed as well as the technologies that can be used as their advantages and disadvantages.

Once the operation of an MSW incineration plant is known, will proceed to the development of the project. The main objective of the study is the creation of an incineration plant capable of treating 49.000 tons of waste per year, coming from 100 citizens. For this purpose, the land where the plant will be located will be chosen and the different technologies used will be shown. Within this second part, all the calculations made for the correct operation of the system will also be indicated.

To conclude, an economic study of the final project will be carried out, thus obtaining the cost of the total investment, 4.244.849 euros, and the cost of treating one ton of waste in the plant, 16,42 euros. In this last section, the feasibility of the project will also be studied.

RESUM

“Disseny de una planta incineradora de residus sòlids urbans per a les comarques de l'Alcoià i el Comtat”

Aquest document realitza un estudi sobre la implantació i el disseny d'una planta incineradora de residus sòlids urbans a les comarques de l'Alcoià i el Comtat. Es pot dividir en tres parts fonamentals, en la primera, la introductòria, s'estableix el marc teòric de la incineració de residus, a més s'exposen conceptes com a economia circular, revaloració de residus o el 'Waste to Energy', els quals seran clau per al desenvolupament d'aquest projecte. Dins d'aquesta mateixa part també es parlarà sobre el procés d'incineració de residus, com es desenvolupa, que tecnologies es poden utilitzar i quines són les més convenients en cada cas.

Una vegada conegut el funcionament d'una planta incineradora de RSU, es procedirà al desenvolupament del projecte. L'objectiu principal de l'estudi és el de la creació d'una planta incineradora capaç de tractar 49.000 tones de residus anuals, procedents de 137.289 habitants. Per a això es triarà el terreny on se situarà la planta i es mostraran les diferents tecnologies utilitzades. Dins d'aquesta segona part es trobaran també tots els càlculs realitzats per al correcte funcionament del sistema.

Finalment, es realitzarà un estudi econòmic del projecte final, obtenint així el cost de la inversió total, 4.244.849 €, i el cost de tractar una tona de residus en la planta en qüestió, 16,42 €. En aquest últim apartat s'estudiarà també la viabilitat d'aquest.

Tabla de Contenidos

RESUMEN	3
SUMMARY	4
RESUM.....	5
LISTADO DE FIGURAS	9
LISTADO DE TABLAS.....	11
I. INTRODUCCIÓN	13
I.1. ANTECEDENTES.....	14
I.1.1 El tratamiento de Residuos en el s.XXI	14
I.2 Clasificación de los Residuos.....	17
I.3 El Problema de los Vertederos y sus Posibles Soluciones	19
I.4 La Incineración de Residuos	23
I.4.1 Qué papel desempeña actualmente.....	23
I.4.1 Funcionamiento de una Planta Incineradora de RSU	26
I.4.2.1 Pretratamiento, Almacenamiento y Manejo.....	30
I.4.2.2 Tratamiento Térmico	33
I.4.2.2.1 Incineradores de Parrilla.....	35
I.4.2.2.2 Hornos Rotatorios	38
I.4.2.2.3 Hornos de Lecho Fluidizado.....	40
I.4.2.3 Etapa de Recuperación de Energía	43
I.4.2.4 Tratamiento de Gases de Combustión	45
I.4.2.4.1 Técnicas de Reducción de las Partículas presentes en los Gases de Combustión	47
I.4.2.4.2 Técnicas para la reducción de gases ácidos	51

I. Introducción

1.4.2.4.3 Tratamiento de los Óxidos de Nitrógeno52

1.4.2.4.3 Técnicas para la reducción de emisiones de Hg.....55

II. OBJETIVOS.....57

II.1. Objetivo general..... 58

II.2. Objetivos Particulares 59

III. DESARROLLO DEL PROYECTO60

III.1. Localización 61

III.2 Volumen de residuos a tratar 63

III.3 Selección de equipos y tecnologías para la planta..... 65

III.3.1 Equipo de combustión..... 65

III.3.2 Equipos para el tratamiento de gases de combustión (TGC) 67

III.3.2.1 Reducción de partículas presentes en los gases 67

III.3.2.1 Reducción de gases ácidos 69

III.3.2.1 Reducción de emisiones de NOx 70

III.4 Cálculos realizados..... 71

III.4.1 Balances de Materia..... 71

III.4.1.1 Entrada de residuos y su composición..... 72

III.4.1.2 Entrada de combustible CH₄..... 74

III.4.1.3 Determinación del exceso de aire..... 75

III.4.1.4 Gases de combustión..... 77

III.4.1.5 Cálculo de residuos sólidos 82

III.4.1.5 Cálculo de reactivos para el tratamiento de los gases de salida 84

III.4.2 Balances de Energía..... 87

III.4.2.1 Energía generada 87

III.4.2.1 Pérdidas de energía..... 88

III.4.2.1 Balances de Energía..... 91

I. Introducción

III.4 Estudio Económico	95
III.4.1 Costes del sistema incinerador y de la tecnología de la planta.....	95
III.4.2 Costes de capital o Inversión total	97
III.4.3 Costes anuales de operación y mantenimiento	99
IV. CONCLUSIONES.....	102
V. APÉNDICES	105
V.1. REFERENCIAS	106

LISTADO DE FIGURAS

Ilustración 1: Jerarquía en la gestión de residuos según la UE.....	15
Ilustración 2: Transición hacia una economía circular.....	17
Ilustración 3: Técnicas de tratamiento de los RSU en España desde el año 2000 hasta el 2015.....	20
Ilustración 4: Las cuatro fases del proceso de compostaje en función de la temperatura.....	22
Ilustración 5: Máquina volteadora de compost.....	23
Ilustración 6: Diagrama de bloques una Planta Incineradora de residuos.....	28
Ilustración 7: Procesos de conversión térmica.....	29
Ilustración 8: Componentes de una planta incineradora de residuos sólidos urbanos con limpieza de gases de combustión.....	31
Ilustración 9: Búnker de almacenamiento de RSU.....	33
Ilustración 10: Esquema de una Incineradora de Parrilla.....	36
Ilustración 11: Diseño de hornos con diferentes direcciones de flujo de gases de combustión y de residuos.....	38
Ilustración 12: Esquema estructural de una instalación de horno rotatorio.....	39
Ilustración 13: Horno de lecho fluidizado estacionario.....	41
Ilustración 14: Horno de lecho fluidizado circulante.....	42
Ilustración 15: Horno de lecho fluidizado circulante y caldera de recuperación del calor de combustión para la obtención de vapor.....	45
Ilustración 16: Técnicas de reducción de partículas presentes en los gases de combustión según el tamaño de partícula.....	47
Ilustración 17: Precipitador electrostático.....	48
Ilustración 18: Filtro de manga.....	49
Ilustración 19: Ciclón.....	50

I. Introducción

Ilustración 20: Relación entre reducción de NO _x , producción, fuga de amoníaco y temperatura de reacción para el proceso de RNCS.....	54
Ilustración 21: Vista satélite del terreno donde se situará la planta incineradora de RSU	61
Ilustración 22: Horno de Parrilla DynaGrate	66
Ilustración 23: Precipitador electrostático de B&W	68
Ilustración 24 : GEA Niro Spray Dryin Absorption (SDA)	70
Ilustración 25: Atomizador Rotativo GEA Niro patentado.....	70
Ilustración 26: Esquema del horno incinerador y sus correspondientes entradas y salidas	72
Ilustración 27: Toneladas de residuos frente a costes de inversión.....	96

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Porcentaje de residuos municipales que deben ser reciclados y reutilizados en los próximos años en Europa.....	21
Tabla 2: Objetivos para el reciclado de envases en los próximos 10 años en Europa.....	22
Tabla 3: Poder calorífico en Mj/Kg de distintos RSU	25
Tabla 4: Composición típica de los RSU en distintos países	26
Tabla 5: Características y condiciones de los principales procesos térmicos.....	30
Tabla 6: Principales Ventajas e Inconvenientes de los Hornos de Lecho Fluidizado	42
Tabla 7: Tasa de generación de residuos urbanos en el periodo 2002-2004 en función de la carga de población y su promedio (Kg/hab.día)	63
Tabla 8: Composición de los RSU que entran a la planta	73
Tabla 9: Flujos máxicos de los elementos que forman los RSU.....	74
Tabla 10: Características del combustible	74
Tabla 11: Flujo de aire real	77
Tabla 12: Corrientes de entrada al volumen de control.....	78
Tabla 13: Corriente de salida del volumen de control	78
Tabla 14: Carbono de salida.....	80
Tabla 15 : Gases de combustión a la salida.....	81
Tabla 16: Composición de las escorias y las cenizas volantes.....	83
Tabla 17: Composición de los elementos minoritarios de losRSU	83
Tabla 18:Flujo de los gases de combustión antes y después de tratar con urea	85
Tabla 19: Flujo de los gases de combustión antes y después de tratar con la cal hidratada	86
Tabla 20 : Energía desprendida por los gases de combustión	89
Tabla 21: Energía desprendida a través de las escorias y las cenizas volantes.....	91

I. Introducción

Tabla 22: Toneladas de residuos frente a costes de inversión.....	95
Tabla 23: Costes reactivos.....	97
Tabla 24: Costes gas natural.....	97
Tabla 25: Costes de capital directos e indirectos.....	99
Tabla 26: Costes anuales de operación y mantenimiento.....	100

I. INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

I. Introducción

I.1. ANTECEDENTES

La industrialización que ha sufrido el mundo en estos últimos años ha hecho que el tratamiento de residuos se haya convertido en uno de los procesos más importantes de esta sociedad. La palabra residuo, según el artículo 3 de la DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO hace referencia a cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse. Además, los residuos como tal no tienen ningún valor económico y pueden ser perjudiciales no solo para los seres humanos sino también para su ecosistema.

En el año 2015, 17 objetivos fueron aprobados para la Agenda del 2030 por los Estados Miembros de las Naciones Unidas, a estos se les llamaron Objetivos del Desarrollo Sostenible. Se trata de un ambicioso reto a nivel mundial, que trata de crear un mundo mucho más sostenible. Aunque actualmente se está progresando en la materia queda un largo camino por recorrer, y es por ello por lo que este proyecto se centrará en el objetivo número 12, Producción y consumo responsables. Es decir, como revalorizar los productos que se dan por inservibles.

Debido a la cantidad de residuos sólidos urbanos (RSU) que se generan al año, se han puesto en marcha una serie de procesos de tratamiento de residuos donde estos se convierten en energía la cual puede ser aprovechada.

En este trabajo se va a investigar la incineración de los RSU en una zona urbana determinada y como esta técnica, ya extendida por gran parte del mundo, puede ayudar a la situación actual.

I.1.1 El tratamiento de Residuos en el s.XXI

A nivel mundial se producen más de 2.100 millones de toneladas de residuos al año, de las cuales solo un 16% (323 millones de toneladas) es basura reciclada. Según la organización británica Verisk Maplecroft, estamos frente a una importante crisis, la cual sigue aumentando de forma exponencial. Este problema se ve incrementado cuando solo

I. Introducción

un país como Estados Unidos, el cual forma un 4% de la población global, genera un 12% de los desechos mundiales, es decir 239 millones de toneladas al año. Viendo esta situación es necesario actuar, el tratamiento de residuos es una de las soluciones, pero no hay que olvidar que para poder afrontar una crisis de este calibre debe ser la misma población la que se conciencie ya que solo se reducirá la cantidad de residuos si se genera menos y se recicla más.

En la Directiva 2006/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, del 5 de abril de 2006, relativa a los residuos se establecen una serie de parámetros para la gestión de residuos, entre ellos se exige a los estados miembro que tengan planes de gestión de residuos que sean respetuosos con el medio ambiente, para ello se creó la jerarquía de residuos, *Ilustración 1*. Como su nombre indica se trata de un orden de prioridades en la legislación y la política sobre la prevención y la gestión de residuos.

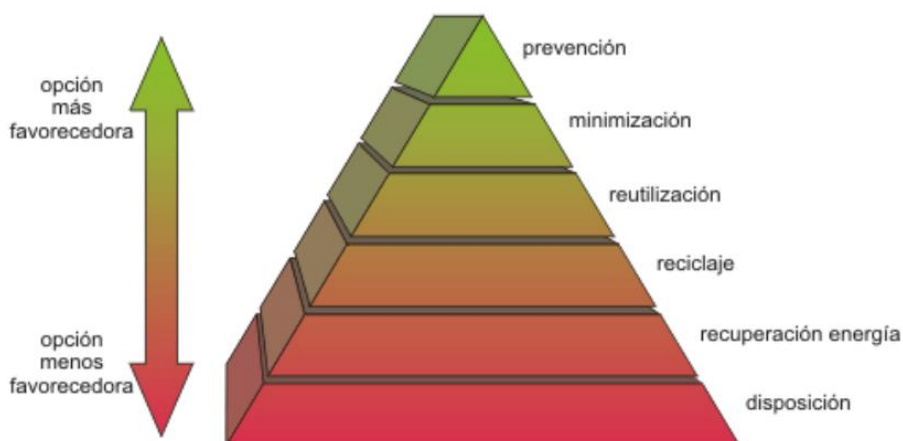


Ilustración 1: Jerarquía en la gestión de residuos según la UE

Es de lógica que la prevención y la minimización se encuentren en un primer lugar, ya que como se ha mencionado anteriormente, la mejor forma de reducir la cantidad de desechos es consumiendo menos. Lo cual es una tarea difícil para una sociedad acostumbrada a una forma de vida consumista. Es aquí donde surgen conceptos como la reutilización, el reciclaje o la revalorización. Estos tres conceptos se

I. Introducción

basan en una misma idea, poder darle un valor o una utilidad a los desechos que se producen día a día, esta es la base de la economía circular.

Para poder adoptar una economía circular se debe olvidar el concepto que hasta ahora la sociedad había adoptado, basado en generar, consumir y desechar, es decir, un proceso lineal con un único ciclo de vida. Para que los objetivos del Parlamento Europeo y del Consejo se cumplan es necesario reemplazar este modelo por otro basado en el aprovechamiento de recursos, inspirado en el funcionamiento de la naturaleza donde no existe el término residuo, ya que todo lo que se genera sirve de alimento o fuente de energía para otro organismo. En la economía circular se busca el aprovechamiento de los recursos en todas las fases del ciclo de vida del producto o servicio; realiza una evaluación del impacto ambiental desde el diseño, la adquisición de materias primas y la fabricación y transporte de este; y además incrementa la durabilidad de los productos terminando así con el concepto de obsolescencia programada. Esta no solo se limita a los bienes de consumo, sino que también es aplicable a otro tipo de servicios donde se combina con fuentes de energía renovables. En la *Ilustración 2* se puede ver de forma ilustrativa la transición hacia este tipo de economía. Se trata de un flujo cerrado en el que, según un reciente informe de ONU Medio Ambiente, se podría reducir hasta más de un 80% de los desechos industriales y de sus emisiones, en determinados sectores.

I. Introducción

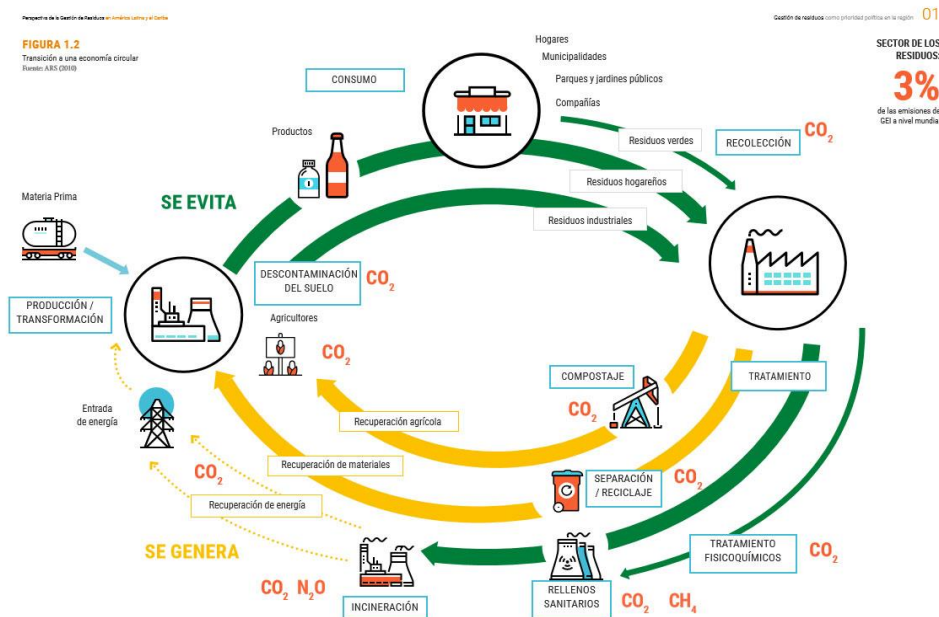


Ilustración 2: Transición hacia una economía circular

Aquí es donde se introduce el proceso de incineración de los RSU, cuyo objetivo es el de reducir el peso y el volumen de los residuos y sustituir a los vertederos, los cuales constituyen la técnica más utilizada en el tratamiento de desechos hasta el momento. Además, la energía que se desprende en la incineración puede ser aprovechada para otro proceso, por lo que se considera también una técnica de valorización energética.

I.2 Clasificación de los Residuos

Con anterioridad se ha definido el concepto de residuo, y en este apartado se explicará cómo se clasifican, ya que hay una serie de factores que afectan como, por ejemplo, su lugar de procedencia, su peligrosidad o bien su biodegradabilidad. En el artículo 3 de la ley 22/2011 del 28 de julio sobre residuos y suelos contaminados se hace la siguiente distribución:

1. Residuos domésticos: Estos son los más comunes y conocidos por los ciudadanos, ya que son los generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. Los aparatos eléctricos y electrónicos, la ropa, las pilas, los

I. Introducción

muebles y también los escombros procedentes de pequeñas obras de construcción del hogar se incluirían también dentro de esta categoría.

Además, los residuos procedentes de la limpieza de vías y zonas públicas también son considerados como domésticos.

2. Residuos comerciales: Cualquier residuo procedente del sector servicios o generados por la propia actividad del comercio, es decir, generado por ejemplo por bares, oficinas y mercados.

3. Residuos industriales: Los resultantes de los procesos de fabricación, transformación, utilización, consumo o limpieza generados por la actividad industrial.

4. Residuos peligrosos: Aquellos que presentan una o varias de las características peligrosas enumeradas en el anexo III, aquél que pueda aprobar el Gobierno de conformidad con lo establecido en la normativa europea o en los convenios internacionales de los que España sea parte, así como los recipientes y envases que los hayan contenido.

Además, los residuos que pueden ser clasificados según su lugar de procedencia, los cuales son excluidos de la anterior ley son:

5. Residuos sanitarios: Todos aquellos procedentes de centros sanitarios, así como los recipientes y objetos que están en contacto con ellos. Regulados por el Decreto 240/1994 que regula la producción y gestión de residuos en la Comunidad Valenciana.

6. Residuos radioactivos: Según la Ley 54/1997 se define como residuo radioactivo cualquier material o producto desecho sin un propósito práctico el cual está contaminado por radionucleidos en concentraciones por encima de las establecidas por el Ministerio.

7. Los subproductos animales: Estos son regulados por el Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de octubre del 2009. Se trata de productos derivados de los animales los cuales no están destinados al consumo humano.

I. Introducción

Cabe mencionar que existe una clasificación relativa a la eliminación de residuos mediante su disposición en vertederos, según el Real Decreto 1481/2001. Se trata de tres categorías:

Residuos inertes: Como su nombre indica son aquellos residuos no peligrosos los cuales no experimentan ninguna transformación, ni química, ni física, ni tampoco biológica.

Residuos biodegradables: Dentro de esta categoría entrarían todos aquellos capaces de descomponerse de forma aerobia o anaerobia.

Residuos no peligrosos: En esta categoría entran los residuos que no figuran en la definición del artículo 3 de la Ley 10/1998 del 21 de abril de Residuos, es decir aquellos que no son ni inertes, ni peligrosos. No presentan ninguna amenaza ni para los seres vivos ni para su ecosistema

I.3 El Problema de los Vertederos y sus Posibles Soluciones

Como se ha mencionado anteriormente la cantidad de RSU generados al año asciende hasta 2 mil millones de toneladas. Esto supone un problema ya que aún no se han incorporado totalmente las técnicas adecuadas para el tratamiento de estos. Mientras la mayoría de los países desarrollados utilizan los vertederos para el tratamiento y almacenaje de residuos, en los países en vías de desarrollo se está llevando a cabo una eliminación incontrolada de estos, ya que no disponen del capital necesario para realizar un tratamiento adecuado.

Según estudios realizados por la Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA) junto con el 'Global Management Waste Outlook (GWMO)' y el Programa Medioambiental de las Naciones Unidas (UNEP), se estima que alrededor de 2 billones de personas no tienen acceso a servicios de recolección de residuos; mientras que otros 3 billones utilizan técnicas las cuales no son limpias, es decir, no son respetables con el medioambiente.

I. Introducción

Con tanta cantidad de basura generada al año y sin las técnicas necesarias de tratamiento de esta, la mayoría de los países utilizan la opción más barata y simple, el uso de vertederos. Los vertederos de residuos no controlados son la tercera gran fuente antropogénica de emisión de CH₄, un gas de efecto invernadero 24 veces más potente que el CO₂. Lo cual implica un gran riesgo para la salud pública y para el ecosistema terrestre en general.

Un informe llamado “A Roadmap for Closing Waste Dumpsite”, cuya traducción sería “Una hoja de ruta para el cierre de los vertederos”, realizado por ISWA, afirma que el 40% de los desechos generados mundialmente se encuentra en los vertederos, afectando así a la salud de al menos 64 millones de personas. Si no se toman las medidas adecuadas de prevención, para el año 2025 los vertederos representarían el 10% de las emisiones de gases de efecto invernadero.

En la *Ilustración 3* se puede observar la evolución de las distintas formas de tratamiento de residuos desde el año 2000 hasta el 2015, en España. Aquí se puede observar de forma muy visual como el uso de los vertederos predomina muy por encima de otras técnicas.

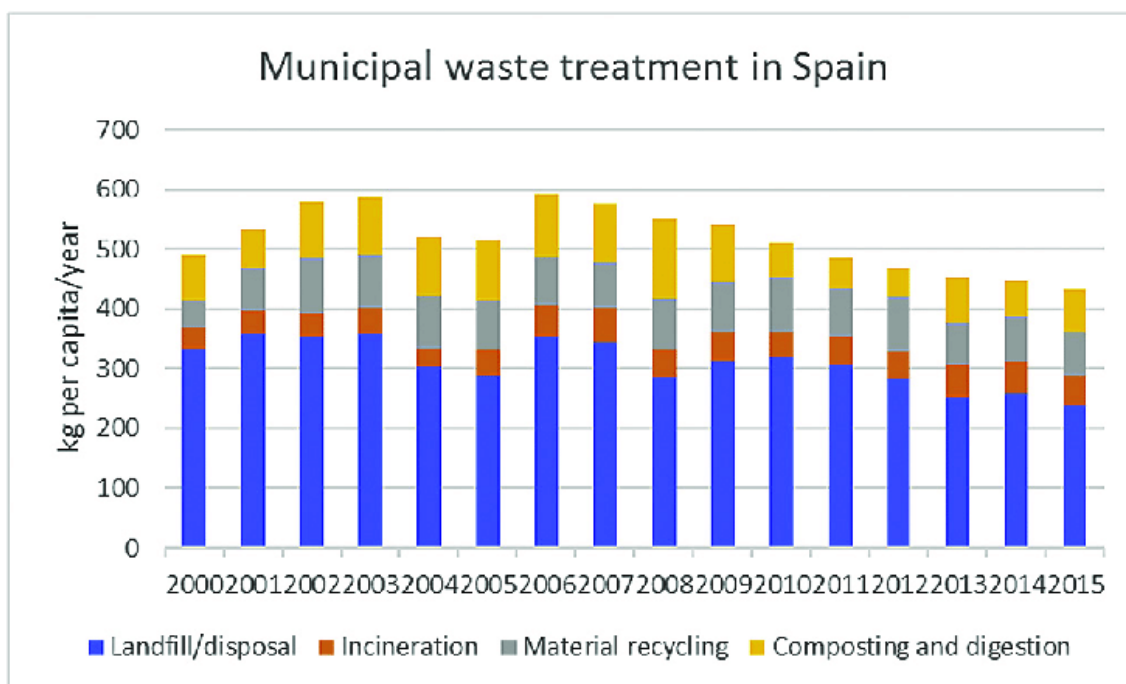


Ilustración 3: Técnicas de tratamiento de los RSU en España desde el año 2000 hasta el 2015

I. Introducción

Teniendo en cuenta estos alarmantes datos la sociedad ha tenido que ir adaptándose para poder evitar la gran crisis tanto económica como de salud pública a la que se iba a enfrentar. Aunque el uso de vertederos ha sido la técnica más usada hasta ahora, en los últimos años se han ido implementando otras las cuales no son tan dañinas para el medio ambiente y además a partir de las cuales se pueden obtener beneficios.

Algunas de estas técnicas son el compostaje, el reciclado y la incineración. Y es que su implementación tiene un menor coste que la limpieza de los residuos eliminados de forma inadecuada.

En mayo del 2018 El Consejo Europeo adoptó un paquete de medidas sobre residuos que establece nuevas normas para la gestión de estos y además establece una serie de ambiciosos objetivos los cuales se basan en la economía circular.

En la *Tabla 1* se muestran el porcentaje de residuos municipales que deben ser reciclados y reutilizados en los próximos años en Europa:

	Antes del 2025	Antes del 2030	Antes del 2035
Residuos municipales	55%	60%	65%

Tabla 1: Porcentaje de residuos municipales que deben ser reciclados y reutilizados en los próximos años en Europa

Además, los Estados miembros afirman que para finales del 2023 se llevará a cabo una recogida por separado de los residuos orgánicos, los cuales podrán ser reciclados por compostaje doméstico, esto se añade a la recogida por separado, ya vigente, para el papel y cartón, el vidrio, los metales y el plástico.

I. Introducción

Mientras que los objetivos específicos para el reciclado de los envases son los mostrados en la *Tabla 2*.

	Antes del 2025	Antes del 2030
Todos los envases	65 %	70 %
Plástico	50 %	55 %
Madera	25 %	30 %
Metales ferrosos	70 %	80 %
Aluminio	50 %	60 %
Vidrio	70 %	75 %
Papel y cartón	75 %	85 %

Tabla 2: Objetivos para el reciclado de envases en los próximos 10 años en Europa

Todas estas medidas se pondrán en marcha para que, a partir del 2030, todos los residuos aptos para el reciclaje u otro tipo de aprovechamiento, sobre todo los RSU, no terminen en vertederos.

En la Ilustración 3 se han visto distintos tipos de tratamiento de los RSU. El compostaje es otra alternativa, según el Real Decreto 506/2013 sobre productos fertilizantes, se trata de un proceso controlado de transformación biológica aeróbica y termófila de materiales orgánicos biodegradables que da lugar a abonos o materias orgánicas. Se puede dividir en 4 etapas según la temperatura: La fase I o Mesófila (10-40°C), la fase II o Termófila (40-75°C), la fase III o de Enfriamiento, y finalmente, la fase IV o de Maduración. A continuación, en la Ilustración 4 se muestra la evolución del proceso de compostaje con la temperatura.

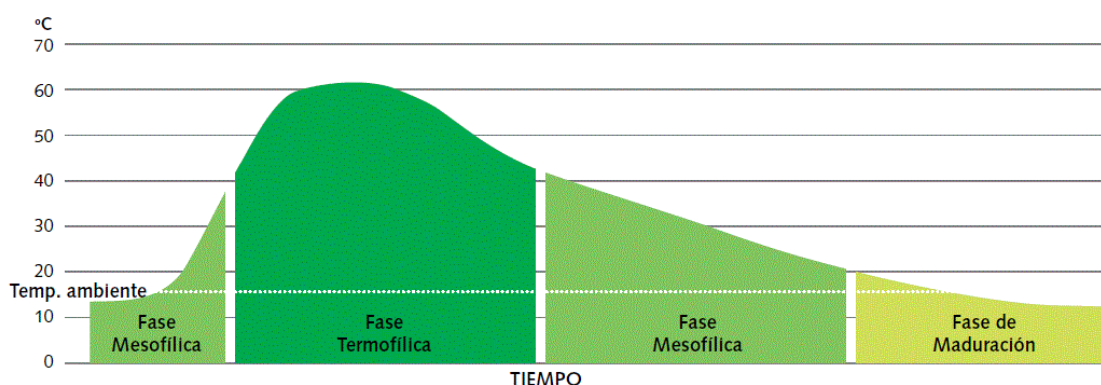


Ilustración 4: Las cuatro fases del proceso de compostaje en función de la temperatura

I. Introducción

El compostaje, al igual que la incineración de residuos es otra de las tecnologías de tratamiento de residuos cuyo objetivo principal es el de darle una segunda utilidad a la basura generada por el ser humano, la revalorización.

Hay dos formas distintas de producir compost a partir de materia orgánica, mediante Pilas Volteadas y mediante Biodigestores. El sistema más económico y usado hasta el momento es el de las pilas volteadas al aire libre, aunque este también se puede llevar a cabo en sistemas cerrados.



Ilustración 5: Máquina volteadora de compost

I.4 La Incineración de Residuos

I.4.1 Qué papel desempeña actualmente

Como se ha visto anteriormente uno de los objetivos principales de la sociedad actual es que para el año 2030 los RSU no terminen en vertederos si no que estos sean reciclados y aprovechados.

La incineración de residuos es una de las técnicas más eficientes para reducir su volumen. Pero sobre esta se cierne un problema medioambiental, por el cual varias ONG se han manifestado en contra. Entidades como GreenPeace afirman que las incineradoras no son eficaces para recuperar cantidades apreciables de energía. Y es que existe el miedo de que, si se pone en marcha la técnica de incineración para la eliminación de los RSU,

I. Introducción

no deje lugar a modelos basados en el reciclaje y la recuperación. Además, a esta preocupación se le añaden las emisiones de cenizas y sustancias químicas que se emiten a la atmósfera por la quema de desechos.

Y es que como se muestra en la *Ilustración 2*, la incineración juega un papel en la transición hacia una economía circular, respetando siempre la jerarquía de residuos de la UE. Es decir, reciclado y reutilización pueden convivir con la incineración de residuos, si estas técnicas se equilibran la sociedad estará más cerca de un sistema de consumo de flujo cerrado. En cuanto a la controversia con las emisiones generadas, los sistemas de incineración de los RSU cumplen con la normativa establecida por la Directiva de Emisiones Industriales, es decir que toda parte del proceso se encuentra dentro del marco legislativo.

En países miembro de la UE como Bélgica, Países Bajos, Suecia, Dinamarca, Alemania, Austria y Finlandia, la incineración junto con el reciclaje juega un papel muy importante en cuanto al tratamiento de residuos. Es mediante la puesta en marcha de estas dos técnicas como los países de Europa noroccidental han eliminado prácticamente los vertederos y han creado una sociedad mucho más sostenible. Aunque se pretende que este modelo se extienda a toda Europa, en las zonas del este y el sur los vertederos siguen siendo la principal solución para el tratamiento de desechos. Y es que implementar nuevas tecnologías mucho más respetables con el medio ambiente conlleva un alto coste, el cual hay países que no pueden asumir. Se necesita de mucho capital para poder implementar una planta de tratamiento térmico, no solo por la instalación inicial sino también por el continuo control que requieren. Además, es necesario que los RSU que se vayan a tratar consten de un alto poder calorífico para que el tratamiento sea realmente útil. Residuos como el papel, el plástico o los textiles cuentan con un alto poder calorífico a diferencia de la materia orgánica, este es el motivo por el cual esta tecnología funciona sobre todo en países ricos con un mayor nivel de consumismo y en cambio resulta difícil de implementar en países en vía de desarrollo.

I. Introducción

Composición	Poder calorífico [MJ/Kg]
Papel	16
Materia orgánica	4
Plástico	35
Vidrio	0
Metales	0
Textiles	19
Otros materiales	11

Tabla 3: Poder calorífico en Mj/Kg de distintos RSU

El valor mínimo de poder calorífico de los residuos para que la incineración cumpla con su principal objetivo es de al menos 7 MJ/Kg y no debe descender de los 6 MJ/Kg. Además, hay determinados factores que también influyen en el poder calorífico de los RSU, como son el contenido de agua y de cenizas. Y es que a mayor humedad y densidad más difícil será poner en marcha el proceso térmico.

En la *Tabla 4* se muestra la composición típica de los RSU de países con diferentes niveles económicos.

I. Introducción

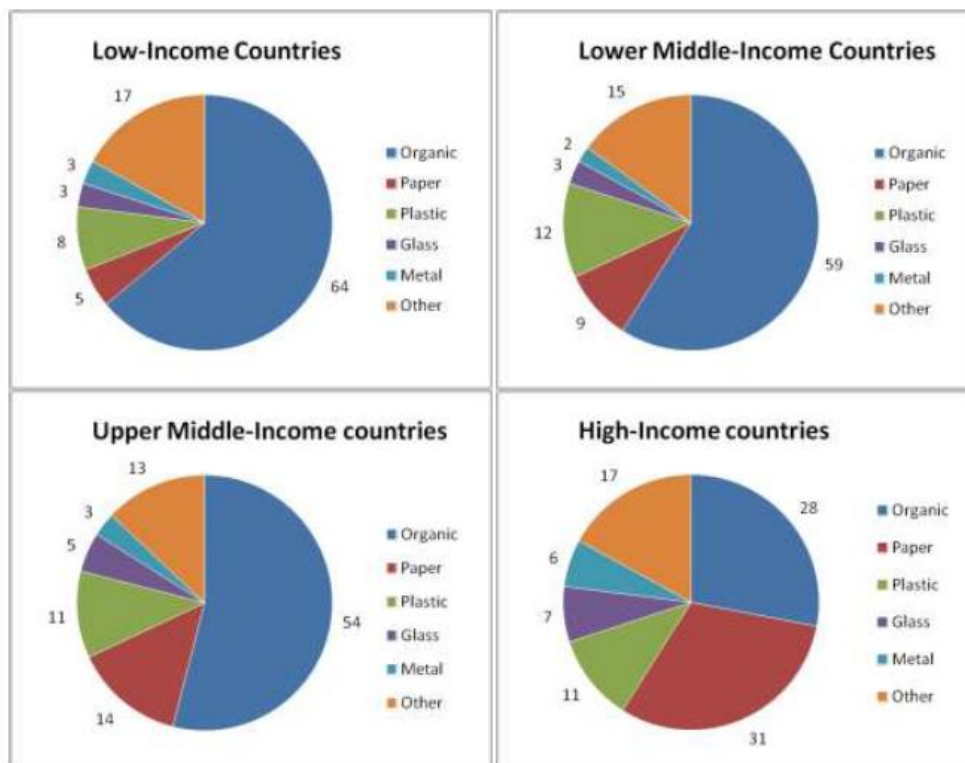


Tabla 4: Composición típica de los RSU en distintos países

Gracias a estas ilustraciones se puede entender de forma visual porque esta técnica es mucho más factible en países desarrollados, sus residuos sólidos urbanos constan de una mayor potencia térmica.

I.4.1 Funcionamiento de una Planta Incineradora de RSU

Hasta ahora se ha contextualizado el proceso de incineración de residuos en el marco histórico actual, se ha descrito cuál es su principal objetivo, que papel desempeña en la economía circular y cuáles son los principales factores que influyen en su puesta en marcha.

La incineración es una combustión oxidativa total muy exotérmica y la cual se debe llevar a cabo a elevadas temperaturas. Debido a la naturaleza irregular de los residuos sólidos, no hay una partícula estándar que englobe a todos los RSU que se

I. Introducción

vayan a incinerar, sino que el proceso de combustión puede variar según la composición, el tamaño, la densidad y la estructura de dichas partículas.

Para poder explicar el funcionamiento de una planta incineradora se debe presentar su estructura lineal de operaciones, dividida según: recepción de los residuos, almacenamiento de estos y de materias primas, pretratamiento, carga de los residuos en el proceso, tratamiento térmico, etapa de recuperación y conversión de energía, limpieza de los gases de combustión, gestión de residuos de limpieza y gases de combustión, descarga de los gases de combustión, monitorización y control de emisiones, control y tratamiento de aguas residuales, gestión y tratamiento de cenizas, y finalmente, descarga y eliminación de residuos sólidos.

Es importante tener en cuenta que muchas de las instalaciones funcionan las 24 horas del día, casi todos los días del año, y es por ello por lo que la implantación de una planta incineradora conlleva también el continuo control y mantenimiento de esta.

En la *Ilustración 6* se representa el diagrama de bloques de una instalación de incineradora con sus elementos básicos. Los bloques están dispuestos según las separaciones de materia que se van formando debido a los distintos procesos, cuando los residuos pasan por el primer horno se separa la escoria de las cenizas, las cuales a continuación pasaran a una caldera de recuperación. Finalmente, el flujo de gas una vez tratado y depurado, sale de la instalación por una chimenea en la cual se realiza un estudio de composición de este, se trata de uno de los pasos más importantes ya que debido a la composición del gas podemos saber si el flujo que se va a emitir a la atmósfera cumple con los estándares aprobados por la ley, y por tanto si el proceso está siendo o no sostenible. El diagrama está organizado de forma que, la línea horizontal de bloques naranja conforma el flujo principal que va avanzando a través de los distintos tratamientos hasta ser emitido.

I. Introducción

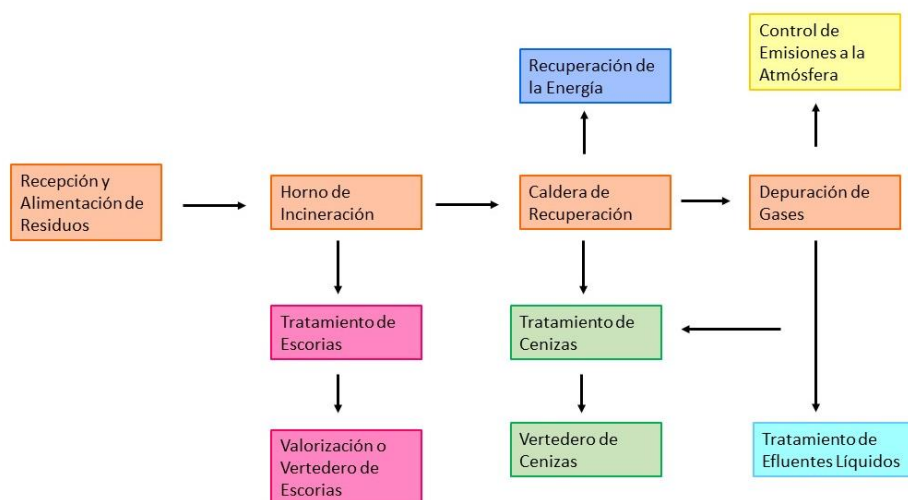


Ilustración 6: Diagrama de bloques una Planta Incineradora de residuos

La recuperación de la energía es uno de los principales objetivos de este tratamiento térmico, y es que las plantas incineradoras están diseñadas de modo que se pueda recuperar el calor generado en el proceso. Además de que los productos resultantes o bien se puedan reciclar o se reduzca al mínimo su cantidad y su peligrosidad.

Hasta ahora se ha explicado de manera general qué es el proceso de incineración y en qué partes se divide una planta incineradora, pero cabe destacar que, aunque esta es la técnica más usada en el tratamiento térmico de residuos, existen otras dos: la pirólisis (degradación térmica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno), y la gasificación (oxidación parcial). Básicamente estas tres técnicas se diferencian según la concentración de oxígeno, como se puede visualizar claramente en la *Ilustración 7*.

I. Introducción

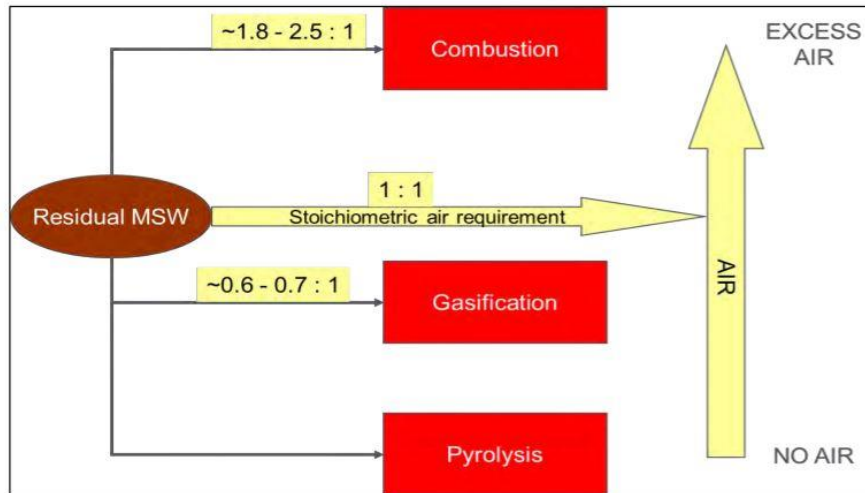


Ilustración 7: Procesos de conversión térmica

Aunque las plantas de pirólisis y gasificación siguen una estructura muy parecida a la de incineración de residuos, hay ciertas diferencias marcadas:

-pretratamiento: el pretratamiento en los procesos de pirólisis y gasificación es más extenso, debido a que la alimentación debe ser más específica, es necesario un tratamiento más exhaustivo de las partículas entrantes. Además, es necesario contar con equipo adicional para el adecuado manejo de la materia rechazada.

-carga: mayor control de la hermeticidad

-reactor térmico: puede sustituir la etapa de combustión, o bien usarse como un elemento adicional a esta.

-manejo de productos: el manejo, almacenamiento y tratamiento de los productos gaseosos y sólidos resultantes del proceso.

-combustión de productos: en este caso la combustión puede ser tratada como una etapa que incluya la recuperación de energía por combustión de los productos y tratamiento y gestión de las fases gaseosas, líquidas y sólidas.

I. Introducción

En la *Tabla 5* se recogen las condiciones y características pertenecientes a cada proceso:

	Pirólisis	Gasificación	Combustión
Temperatura de reacción (°C)	250-700	500 - 1600	800-1450
Presión (bares)	1	1 - 45	1
Atmósfera	Inerte/nitrógeno	Agente de gasificación: O ₂ , H ₂ O	Aire
Relación estequiométrica	0	<1	>1
Productos del proceso			
Fase gas:	H ₂ , CO, hidrocarburos, H ₂ O, N ₂	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂	CO ₂ , H ₂ O, O ₂ , N ₂
Fase sólida:	Ceniza, coque	Escoria, ceniza	Ceniza, escoria
Fase líquida:	Aceite de pirólisis y agua		

Tabla 5: Características y condiciones de los principales procesos térmicos

I.4.2.1 Pretratamiento, Almacenamiento y Manejo

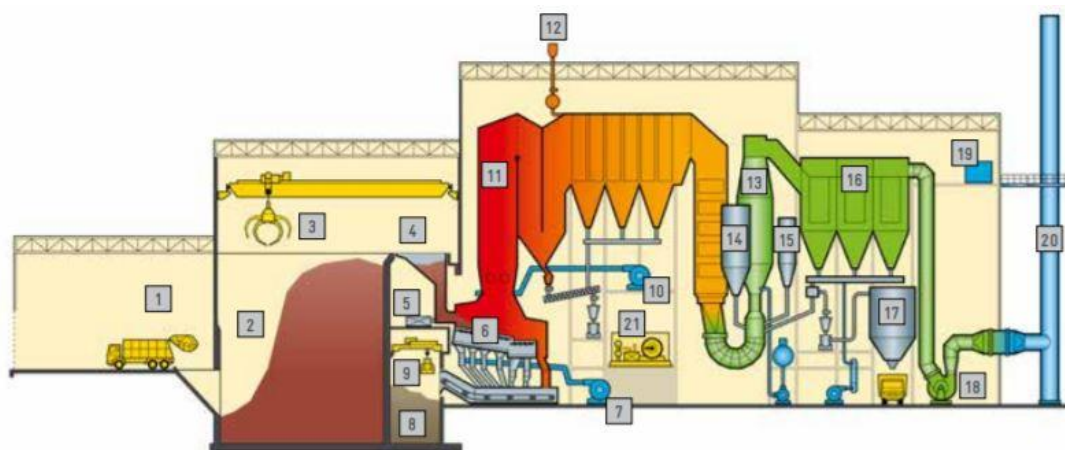
Aunque este es un caso de estudio de una planta incineradora, es importante saber que la recogida y el pretratamiento de los RSU fuera de la planta influirán en gran medida en el funcionamiento de esta. Y es que como se ha visto en la tabla X no todos los RSU tiene el mismo potencial calorífico. Por lo que una recogida selectiva de los residuos puede impactar notablemente en el proceso térmico de la planta.

Si se eliminan el vidrio y los metales se producirá un aumento en el poder calorífico del resto de residuos, mientras que, al mismo tiempo, se reducirá la cantidad de metales recuperables en la escoria. Por el contrario, si la fracción eliminada es de papel, cartón y plástico, el poder calorífico de los restantes residuos experimentará una importante reducción en su poder calorífico. Por lo que respecta a los residuos orgánicos, si su cantidad en la alimentación de la planta se reduce, se reducirán así las cargas de humedad y además el valor calorífico neto aumentará.

I. Introducción

A continuación, en la *Ilustración 8* se muestra un esquema de todas las partes de una planta incineradora de residuos sólidos urbanos.

Como se puede ver claramente, a la parte izquierda se encuentran las etapas de recepción, almacenaje y manejo, de las cuales se va a hablar a continuación. Seguidamente se encuentra la etapa de combustión. Una vez se produce la incineración de residuos, la planta da lugar al sistema de limpieza de gases de combustión. En este esquema la etapa de generación de energía está situada justo debajo del sistema de calderas.



WASTE DELIVERY

- 1 Tipping hall
- 2 Waste bunker
- 3 Waste crane
- 4 Waste feeding chute

INCINERATION

- 5 Ram feeder
- 6 Incineration grate
- 7 Primary air fan
- 8 Bottom ash bunker
- 9 Bottom ash crane
- 10 Secondary air fan
- 11 Steam boiler
- 12 Boiler safety valve

FLUE GAS CLEANING

- 13 Flue gas reactor
- 14 Hydrated lime
- 15 Activated carbon
- 16 Bag filter
- 17 Residue silo (fly ash)
- 18 ID fan
- 19 Emissions Monitoring System (CEMS)
- 20 Stack

ENERGY RECOVERY

- 21 Steam turbine / generator

Ilustración 8: Componentes de una planta incineradora de residuos sólidos urbanos con limpieza de gases de combustión

El primer paso en el tratamiento de los RSU de una planta incineradora es el de recepción de la alimentación. En un búnker acumulador se mezclan todos los residuos provenientes de los camiones de recogida, tras su inspección y pesaje. Es necesario el

I. Introducción

aislamiento de la zona de suministro y del búnker acumulador ya que se debe evitar la dispersión del hedor, el ruido de las operaciones y cualquier tipo de emisión que puedan emitir los residuos.

Aunque cabe destacar que previamente a la alimentación de la planta, se realiza un pretratamiento de los desechos basado en la trituración de las balas prensadas, los residuos voluminosos, etc. Para ello se emplea el siguiente equipo:

- Cortadoras de palanca

- Trituradoras

- Molinos

- Cortadoras giratorias

La finalidad principal del pretratamiento es la de reducir los residuos voluminosos cuando su tamaño supera el del equipo de alimentación del horno, o bien, homogeneizar el residuo para poder aportar unas características de combustión más consistentes. Por lo que las técnicas de pretratamiento de los RSU se basan en la mezcla y la trituración de estos.

El almacenamiento de los residuos se debe hacer en un lugar apropiado. Esta función la realizan los bunkers de almacenamiento de residuos. Como se ha mencionado anteriormente, el búnker es el paso previo a la incineración. En este los residuos se apilan y se mezclan mediante grúas. Está conformado por un lecho de cemento impermeable dotado de un equipo de protección contra incendios. Algunos de los elementos del sistema de protección de los que está dotado son: una serie de cables ignífugos para las grúas, un diseño de seguridad de las cabinas de las grúas, detectores de incendios y cañones aspersores automáticos de agua. En la *Ilustración 9*, se puede observar el interior de un búnker lleno de residuos sólidos urbanos.

I. Introducción



Ilustración 9: Búnker de almacenamiento de RSU

Este tipo de instalaciones suelen trabajar todo el año, las 24 horas del día y es por eso por lo que el búnker suele tener una capacidad de almacenamiento para 3-5 días, aunque esto depende de otros factores como la naturaleza específica del residuo. Esto significa que en el búnker se acumulan cantidades muy grandes de RSU lo cual puede generar una serie de problemas, con el fin de evitar la formación de polvo y gases (como el metano) de los procesos de fermentación, así como la acumulación de olor y emisiones de polvo, el aire de incineración primario para la planta del horno se extraerá de la misma zona del búnker.

I.4.2.2 Tratamiento Térmico

En el proceso de incineración de residuos los productos de alimentación de la planta entran en contacto con el aire en unas condiciones de temperatura capaces de transformar los compuestos hidrocarbonados en dióxido de carbono y agua, generando así calor de combustión (proceso muy exotérmico). Mientras que el proceso de incineración de gases y de líquidos es bastante sencillos, la incineración de productos sólidos es mucho más compleja. Esto es debido a que en el caso de los gases combustible y carburante forman una sola fase, por lo que solo sería necesario encontrar un equipo que pueda mezclar el aire con el residuo en el menor tiempo posible. Por lo que respecta al caso de los líquidos, son dos las fases que se ponen en contacto, el equipo en este caso donde se produce la combustión debe conseguir la mayor área de contacto entre ambas

I. Introducción

fases y una velocidad de transferencia elevada. Existen utensilios llamados atomizadores capaces de dispersar finas gotas procedentes del líquido en el aire de combustión. Pero el proceso se vuelve mucho más complejo cuando el producto que se pretende incinerar es sólido, al tratarse de una mezcla heterogénea, no se puede pulverizar para lograr su dispersión en el aire.

Hay una serie de requerimientos para que el proceso de combustión del producto sólido sea el adecuado:

- Ha de haber una buena área de contacto entre el sólido y el aire para que se pueda alcanzar la temperatura de combustión y que los reactantes se puedan transformar en los productos de la reacción. Además, la velocidad de transferencia de materia y de transmisión de calor debe ser elevada para que el proceso sea satisfactorio.

- Debe haber una adecuada distribución de los tiempos de residencia para conseguir la completa transformación de los reactivos. El tiempo de residencia varía según las variables del modelo cinético en cuestión (en este caso gas-sólido). Si se logra un rendimiento adecuado se evita que salgan del horno compuestos inquemados tanto de la fase gas como de la sólida, es decir se logra la completa combustión de los residuos. Este punto es muy importante ya que, si esto se consigue, no solo se aumenta el rendimiento energético del proceso, sino que la emisión de contaminantes se reduce, por lo que el proceso de depuración de gases antes de su emisión a la atmósfera será mucho más eficiente.

- Es importante también que haya una correcta eliminación de cenizas y escorias con el fin de evitar que la fracción no combustible se acumule en el interior del horno. Dependiendo si el proceso es continuo o por cargas, la extracción se hará de forma continua o bien, antes de cada operación.

- Con el fin de que los residuos con los que se ha alimentado el horno vayan alcanzando los valores necesarios para que transcurran correctamente los distintos procesos de combustión, la distribución de temperaturas en el horno debe ser la precisa. Cabe destacar que no solo se producirán los fenómenos deseados, sino que también,

I. Introducción

como en todos los procesos químicos, se podrán producir otros fenómenos que causen problemas de operación.

Como los RSU son una masa heterogénea formada por distintos residuos, la temperatura máxima que podrá alcanzar el horno en el proceso de combustión dependerá del poder calorífico de la alimentación en cuestión, y de la relación aire-combustible.

Debido a la complejidad del proceso, se requiere de unas instalaciones específicas donde poder producir la quema de los residuos, las principales tecnologías utilizadas en el proceso son: los incineradores de parrilla, los hornos rotatorios y los lechos fluidizados.

I.4.2.2.1 Incineradores de Parrilla

La tecnología de hornos de parrilla es la más utilizada en los procesos de incineración de residuos sólidos urbanos por su versatilidad y su capacidad de tratamiento.

Mediante la gravedad o un cilindro hidráulico la carga (residuo) se introduce en la parrilla. A diferencia de otros sistemas en los hornos de parrilla la carga se puede introducir sin necesidad de triturarla lo que favorece que se generen acumulaciones de material que impiden la libre transmisión del calor por radiación.

Como se acaba de mencionar la carga se desplaza sobre la superficie de la parrilla mediante mecanismos como rodillos o parrillas móviles, o bien, mediante planos inclinados que por efecto de la gravedad hacen que los residuos puedan moverse.

A continuación, en la

Ilustración 10, se muestra un esquema de un horno de parrilla donde la carga entra por gravedad. Esta primera zona donde se introducen los residuos se llama parrilla de presecado. Aunque en esta zona el secado que se produce es muy deficiente debido a inaccesibilidad de la humedad contenida en el residuo.

I. Introducción

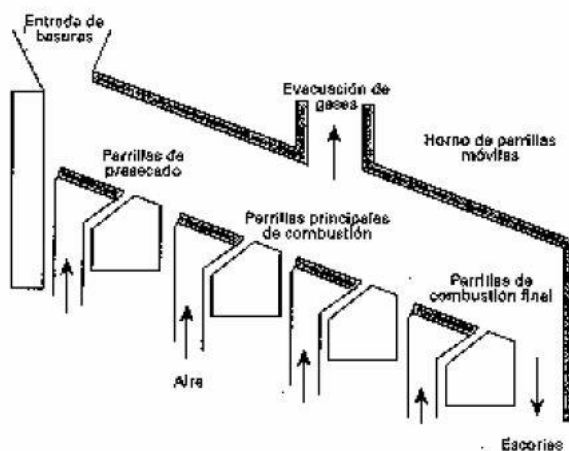


Ilustración 10: Esquema de una Incineradora de Parrilla

A continuación, en la parte central del esquema, se encuentran las parrillas principales de combustión. Es en esta zona donde tendrán lugar los procesos de combustión, gasificación y pirolización de la carga. Aparte de la parrilla situada en la base, la cámara de incineración consta de paredes refrigeradas y no refrigeradas a los laterales, y en la parte superior una superficie de calentamiento de caldera. Debido a que los residuos urbanos suelen tener un alto contenido volátil, los gases volátiles se desprenden y sólo una pequeña parte de la incineración se producirá en la parrilla.

El aire cumple un papel muy importante en este tipo de procesos y es que su alta presencia, este tipo de hornos funcionan con más de un 100% de exceso de aire, produce una serie de desventajas:

- La velocidad es muy elevada y puede producir un gran arrastre en el material (si bien es una velocidad alta para favorecer el arrastre es muy baja para la tasa de transferencia de calor por convección).
- Al tratarse de aire frío (a pesar de que muchas veces entra precalentado a 160°C) esto produce un enfriamiento del residuo impidiendo así la vaporización y la gasificación.

I. Introducción

Uno de los puntos débiles de este tipo de sistemas es que tiene limitada la concentración de calor generado, en otras palabras, la carga térmica. La temperatura que puede soportar la parrilla es bastante inferior a un ladrillo refractario, es por ello que se necesitan sistemas de refrigeración con aire.

En la tecnología de parrilla existen tres diseños distintos de hornos según las direcciones del flujo de gases de combustión y de residuos.

a) Horno de flujo paralelo: Llamados como hornos de flujo paralelo ya que el aire de combustión primario y los residuos siguen la misma dirección a través de la cámara de combustión. Es por ello por lo que la salida de los gases se encontrará al final de la parrilla.

Esta estructura de horno unidireccional conlleva una serie de ventajas: los gases de combustión tienen el mayor tiempo de residencia posible en la zona de ignición además deben pasar por la zona de máxima temperatura, bajas emisiones de CO + NO_x, una combustión muy eficiente y una mejor calidad de la escoria.

b) Horno a contraflujo: A diferencia de los hornos de flujo paralelo, en estos el aire de combustión primario y los residuos siguen direcciones opuestas, es decir, se trasladan a través de la cámara de combustión a contracorriente el uno con el otro. En este caso la salida de los gases de combustión se encuentra en el extremo frontal de la parrilla. El secado y la ignición de los residuos son favorecidos por los gases de combustión calientes.

c) Horno de flujo central: El horno de flujo central se usa cuando la composición de los residuos de alimentación es muy variada. Es por ello por lo que debe conseguirse una buena mezcla de todas las corrientes parciales de gases de combustión, para ello se usan contornos que promuevan la mezcla y/o inyección de aire secundario. Se definen como hornos de flujo central ya que la salida de los gases de combustión está situada en mitad de la parrilla.

En la *Ilustración 11* se muestra un esquema de los diferentes tipos de hornos según la dirección del flujo de gases de combustión y de los residuos.

I. Introducción

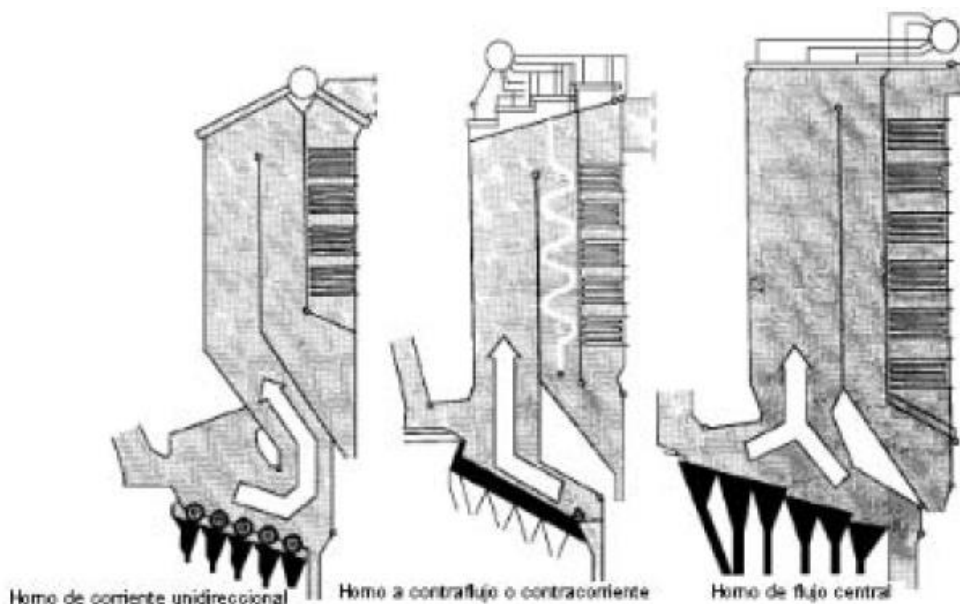


Ilustración 11: Diseño de hornos con diferentes direcciones de flujo de gases de combustión y de residuos

En resumen, los hornos de parrilla admiten cargas de residuos de múltiples tamaños y sin tratamiento previo, además su inversión es de bajo coste. Pero frente a estas ventajas, aparecen una serie de importantes inconvenientes: la generación de residuos carbonosos (coque) en las escorias, el mantenimiento exhaustivo de las parrillas, y la baja calidad de gasificación por puntos calientes en parrillas.

I.4.2.2 Hornos Rotatorios

Aunque no es la tecnología más usada para la incineración de residuos sólidos urbanos, los hornos rotatorios permiten incinerar cualquier residuo, independientemente de su tipo y composición, gracias a su robustez y tamaño. En este tipo de hornos se puede trabajar con residuos sólidos, de naturaleza más fangosa e incluso líquidos, eso sí, la alimentación debe ocupar aproximadamente un 20% del volumen interno del horno.

El rango de temperaturas operativas de este tipo de hornos va de los 850°C hasta los 1100°C. El tiempo de residencia de la alimentación en el interior del horno dependerá no solo de la velocidad de rotación del tambor, sino también de su inclinación.

I. Introducción

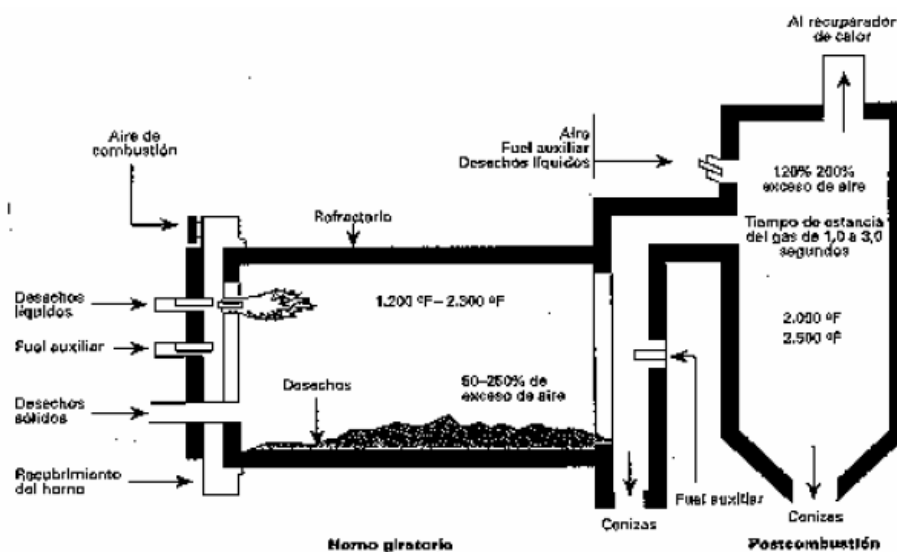


Ilustración 12: Esquema estructural de una instalación de horno rotatorio

En la *Ilustración 12* se muestra el esquema estructural de una instalación de horno rotatorio. Básicamente el sistema consiste en un horno de forma casi-cilíndrica colocado ligeramente inclinado sobre su eje horizontal, esta inclinación no es más que un recurso para la correcta evacuación de las escorias de su interior. El horno se encuentra apoyado sobre dos conjuntos de ruedas las cuales soportan todo el peso de la instalación, que, a su vez, están conectadas a un motovariador el cual controla la velocidad de rotación.

Gracias a la inclinación del horno y a su velocidad de rotación, la cual puede ser controlada como se menciona en el párrafo anterior, es posible adaptar el tiempo de residencia de los sólidos en el interior de la cámara de combustión. Entre unos 30 y 90 minutos sería suficiente para conseguir una buena combustión de los residuos.

A diferencia de los hornos de parrilla, en este tipo de instalaciones el aumento de temperatura es mayor, esto es debido a que su interior está íntegramente construido con materiales refractarios y aislantes.

Otra de las ventajas más notables es que gracias a la posible evacuación de los gases en toda la sección del horno, es factible extraer del horno las escorias de forma continua, lo que evita cualquier tipo de pausa en el proceso.

I. Introducción

A la derecha del esquema se encuentra el horno de postcombustión, cuya finalidad es la de asegurar la destrucción de compuestos tóxicos, para ello se realiza una combustión adicional de los residuos procedentes del horno rotatorio.

1.4.2.2.3 Hornos de Lecho Fluidizado

Cuando los residuos que se tratan son conflictivos y/o pastosos la mejor opción es el uso de hornos de lecho fluidizado.

La fluidización es un término aplicado al proceso por el cual un lecho fijo de sólidos finos se transforma en un líquido mediante el contacto con un gas que fluye de abajo a arriba, este gas suele ser aire. La tecnología de los lechos fluidizados se lleva utilizando desde hace años, y hoy en día es un proceso de conversión de energía bien establecido y ampliamente probado.

Estos sistemas de incineración poseen una distribución uniforme de temperaturas y oxígeno gracias a la buena mezcla que proporciona la naturaleza del reactor, lo que genera un funcionamiento estable.

Se puede diferenciar entre dos grandes grupos de hornos de lecho fluidizado, el estacionario o de borbote y el circulante.

De lecho fluidizado estacionario o burbujeante:

Para asegurar que todas las partículas que constituyen el lecho no son arrastradas por el gas fluidificante, se requiere un tamaño de los sólidos del lecho lo suficientemente grande y una velocidad de gas lo suficientemente baja.

Los residuos se cargan a través del cabezal o los lados, o también se pueden inyectar directamente en el lecho fluidizado. Es aquí donde se machacan y se mezclan con el material del lecho caliente, seguidamente son secados y parcialmente incinerados. Las fracciones restantes se incineran en el margen libre del lecho fluidizado, mientras que la ceniza restante se elimina con los gases de combustión en el cabezal del horno.

El burbujeo ocurre a una velocidad de fluidización superior a la requerida para fluidificar los sólidos dentro del lecho. Así, con el exceso de gas por encima del requisito

I. Introducción

mínimo de fluidificación se forman las burbujas. Estas burbujas se van elevando a través del horno a medida que se van haciendo más grandes.

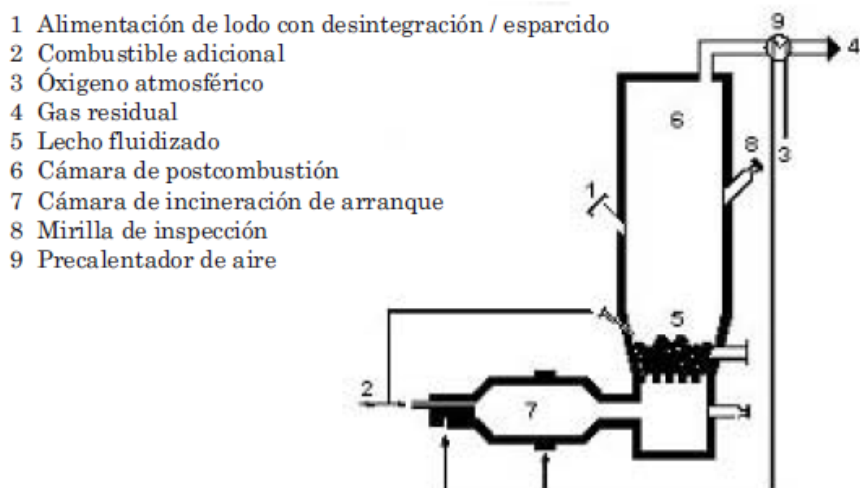


Ilustración 13: Horno de lecho fluidizado estacionario

De lecho fluidizado circulante:

Este tipo de hornos funcionan muy bien en la incineración de lodos de depuradora secos con un alto valor calorífico. Utilizan un material de lecho fino y trabajan a elevadas velocidades de los gases, responsables de eliminar la mayor parte de las partículas de material sólido de la cámara junto con los gases de combustión. Si los sólidos expulsados son conducidos a un ciclón y devueltos a través de un tubo vertical al fondo del lecho, se podrá mantener una buena concentración de sólidos en el interior de la columna. En general, los incineradores de lecho fluidizado circulante trabajan con partículas de menor tamaño, aproximadamente $250 \mu\text{m}$, y velocidades de gas más altas que los de borboteo.

Este tipo de tecnología conlleva una gran ventaja y es que se pueden conseguir elevados rendimientos calóricos. Las plantas de hornos de lecho fluidizado circulante suelen ser más grandes que las de borboteo, esto implica una mayor variedad de residuos de entrada.

I. Introducción

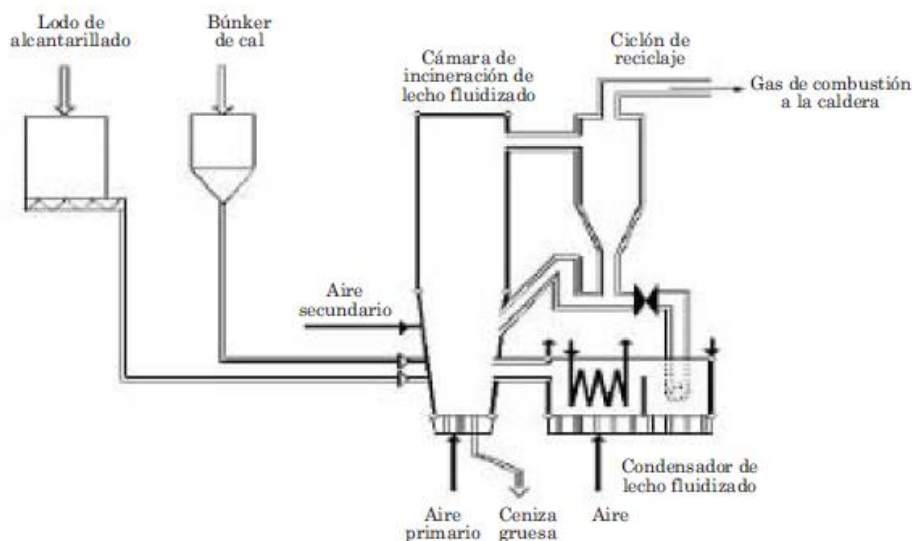


Ilustración 14: Horno de lecho fluidizado circulante

A continuación, en la *Tabla 6*, se encuentran las principales ventajas e inconvenientes de la tecnología de lechos fluidizados:

Ventajas:	Inconvenientes:
Menor exceso de aire (Rendimiento de combustión mayor)	Mayor coste de instalación
Menores temperaturas de trabajo (Se reduce la generación de NO_x)	Control más exhaustivo del tamaño de residuos, el tamaño de los sólidos se debe ajustar a las exigencias de la fluidización
La eliminación de las partes móviles (Se reduce el mantenimiento)	Mayor cuidado con la naturaleza de los residuos para evitar que fundan o colapsen el lecho
Instalaciones más compactas	
Posibilidad de inyectar catalizadores de lecho como el carbonato cálcico para abatir los gases ácidos (SO_2) in situ	

Tabla 6: Principales Ventajas e Inconvenientes de los Hornos de Lecho Fluidizado

I. Introducción

I.4.2.3 Etapa de Recuperación de Energía

Una de las razones por las que la incineración de residuos sólidos urbanos cumple un papel importante en el tránsito hacia una economía circular, es la recuperación de energía del proceso. Por lo que ya no hablamos de un recorrido lineal, con un principio y un fin, sino que, en este caso a partir del calor generado en la reacción de combustión, se obtiene energía.

En el siguiente apartado se explicarán las principales formas de recuperación de esta energía en el proceso de incineración de los RSU.

Como se ha mencionado en los apartados anteriores la combustión es un proceso exotérmico (desprende calor), esta reacción produce una cantidad de energía la cual se transfiere a los gases de combustión. El posterior enfriamiento de los gases permite la recuperación de la energía de los gases de combustión calientes y, la limpieza de estos antes de su emisión a la atmósfera.

El enfriamiento de los gases se realiza mediante el uso de la caldera, la cual aparte de esta, tiene la función de transferir el calor de los gases de combustión a otro líquido, normalmente agua, que en la mayoría de los casos se transforma en vapor. Ambas funciones están ligadas, y una no podría suceder sin la otra.

Los dos principales factores de los que depende el diseño de la caldera son el vapor y el gas de combustión que se vayan a tratar en el proceso. La caldera puede sufrir corrosión debido a la incineración de residuos con altas concentraciones de sustancias corrosivas, como pueden ser los cloruros, en el gas crudo. Como es evidente, los gases de combustión surgen de la incineración de los residuos, es por ello por lo que sus características dependerán principalmente del contenido de estos residuos.

El intercambio de calor en las cámaras de combustión se realizará mediante las paredes de agua, paredes formadas por tubos intercambiadores de calor rellenos de agua, y recubiertos por una capa protectora. Estos serán los encargados de enfriar los gases de combustión. Debido a la alta corrosividad de los gases calientes, la primera

I. Introducción

pasada debe ser en vacío, para así asegurar el correcto funcionamiento de los intercambiadores de calor.

Hay que tener en cuenta que el intercambio de calor entre gases y agua puede verse afectado por las cenizas volantes arrastradas por la corriente de gas, estas quedan adheridas a la caldera empeorando así el intercambio de calor. Si la superficie destinada a la transferencia de calor se ve afectada se produce un empeoramiento en el rendimiento del proceso. Para poder prevenir este tipo de problemas se requiere de métodos especializados en la continua eliminación de estas cenizas.

Si la naturaleza del residuo a tratar y el diseño de combustión son los adecuados se puede lograr uno de los objetivos principales de las plantas incineradoras de residuos, la autosostenibilidad. Y es que estas se pueden llegar a autosostener a partir del calor generado durante proceso, es decir, poder conseguir que el proceso de combustión no requiera de combustible externo. Actualmente, en una incineradora que trate residuos con un poder calorífico superior a 13 MJ/Kg el rendimiento energético puede oscilar entre el 20 y el 30%.

En la *Ilustración 15* se muestra la disposición de la caldera de recuperación del calor de combustión en una planta incineradora. El horno que se encuentra justo debajo de la caldera es de lecho fluidizado circulante.

I. Introducción

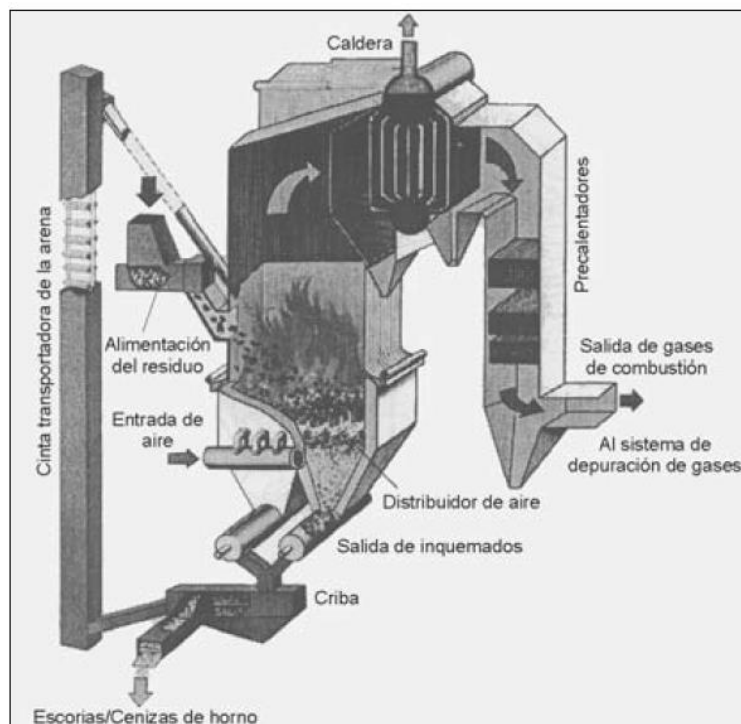


Ilustración 15: Horno de lecho fluidizado circulante y caldera de recuperación del calor de combustión para la obtención de vapor

En resumen, la energía recuperada en este proceso se utiliza tanto para la producción y suministro de agua caliente (en forma de vapor o agua caliente), como para la producción y suministro de electricidad

I.4.2.4 Tratamiento de Gases de Combustión

Las partículas contaminantes que se forman en el proceso de combustión son mayormente transferidas a la corriente gaseosa, formándose así nuevas especies contaminantes. Los diferentes agentes contaminantes presentes en los gases de combustión son los compuestos de cloro, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, sustancias orgánicas, partículas, metales pesados y dioxinas y furanos. Los sistemas de tratamiento y depuración de gases se encargarán de minimizar y eliminar estos agentes contaminantes presentes en los gases, para su posterior emisión a la atmósfera.

I. Introducción

Existen dos tendencias para el tratamiento de los gases. La primera está basada en el control de la contaminación en origen, mediante la segregación en origen y aplicando un perfecto control de los parámetros de combustión. Mientras que la segunda se basa en la depuración de los gases de combustión.

Mientras que el sistema de depuración de gases de combustión es el más usado hasta el momento, y el cual vamos a explicar a continuación, actualmente se está invirtiendo en un sistema de pretratamiento de los RSU, mediante la segregación en origen de los residuos o la trituración antes de que estos entren al horno de combustión. No obstante, el proceso de depuración de gases siempre debe estar presente en las plantas incineradoras.

Los sistemas de tratamiento de gases de combustión están formados por una combinación de unidades de proceso individuales que en conjunto proporcionan un sistema de tratamiento global. Cada unidad individual tiene efecto sobre una o varias sustancias presentes en los gases, y su combinación dará paso a un sistema de depuración eficaz de las corrientes gaseosas.

Así pues, dependiendo del tipo de contaminante sobre el que se va a actuar y el modo de actuación se pueden distinguir tres técnicas de depuración: Técnicas de reducción de partículas, métodos de retención sobre absorbentes y métodos para transformar los compuestos en N_2 , CO_2 y H_2O .

El proceso de retención de las partículas arrastradas por los gases de combustión depende de factores como el nivel de depuración que se quiere alcanzar, el tipo de incinerador empleado, la naturaleza de los residuos a tratar, las propiedades de la corriente gaseosa, etc.

El objetivo principal de la depuración de los gases de combustión es cumplir con la normativa establecida por los diferentes gobiernos sobre las concentraciones de los gases que se emiten a la atmosfera.

I. Introducción

I.4.2.4.1 Técnicas de Reducción de las Partículas presentes en los Gases de Combustión

El tamaño de las partículas a captar es uno de los condicionantes principales para la elección del dispositivo de eliminación. En la *Ilustración 16* se muestra que tipo de tecnología es mejor según el tamaño de la partícula. Cabe destacar que las partículas menores de 1μ son especialmente nocivas para el ser humano.

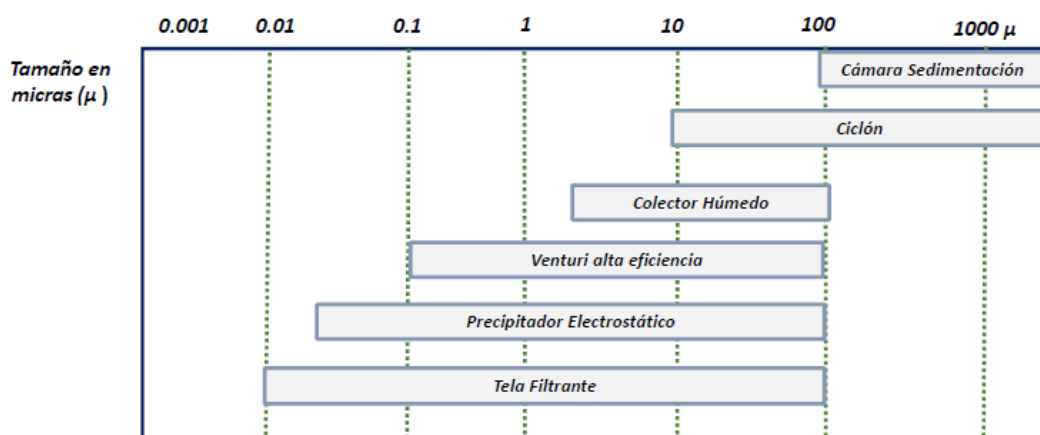


Ilustración 16: Técnicas de reducción de partículas presentes en los gases de combustión según el tamaño de partícula

- Precipitadores Electroestáticos:

En los precipitadores electroestáticos el gas circula a baja velocidad en un recinto que ioniza el aire gracias a la diferencia de potencial en corriente continua (de 60 a 80kV, el consumo eléctrico es elevado). Mediante el uso de un mecanismo de limpieza el polvo cae al fondo de la tolva en intervalos regulares de tiempo.

La eficiencia de la eliminación del polvo depende principalmente de la resistividad eléctrica del polvo.

Esta tecnología es útil cuando el volumen de gas a tratar es elevado y el contaminante de tamaño reducido. Además, puede trabajar a altos niveles de temperatura y presión. La eficacia suele ser superior al 98%.

I. Introducción

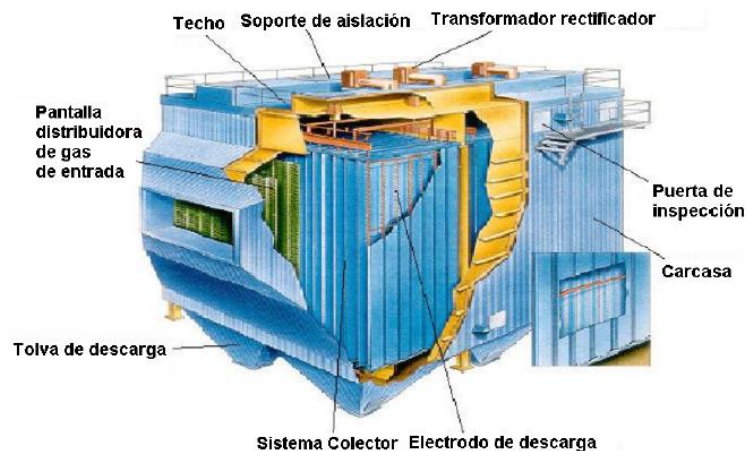


Ilustración 17: Precipitador electrostático

- Filtros de Manga:

También conocidos como filtros de tejido son ampliamente utilizados en los procesos de incineración de residuos ya que su eficacia suele ser superior al 99%. Pueden tratar distintos tamaños de partícula, pero cuando la fracción de estas es inferior a 0.1 micras la eficiencia se reduce.

Los filtros de mangas están formados por una serie de bolsas de filtros capaces de captar las partículas contaminantes, el gas de combustión fluye desde la base del filtro hacia la parte superior, pasando a través de estas bolsas individuales.

Para que la operación sea eficaz hay que tener en cuenta tanto la compatibilidad del medio de filtro con las características del gas de combustión y del polvo, como la temperatura del proceso. El caudal del gas determinará la velocidad de filtrado.

Cuando en los filtros aparecen fugas o trastornos se detecta por el aumento de las emisiones.

I. Introducción

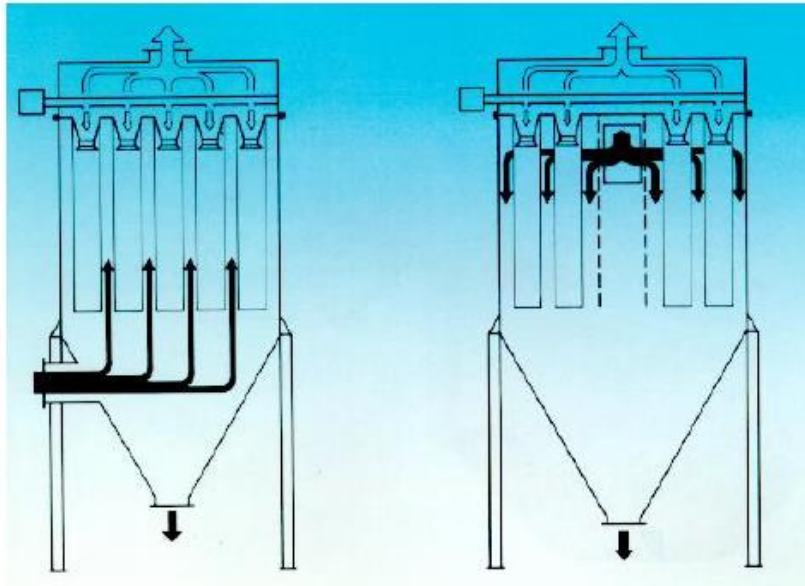


Ilustración 18: Filtro de manga

- Filtros cerámicos:

Con un funcionamiento muy similar al de los filtros de mangas, los cerámicos pueden soportar temperaturas superiores a los 900°C además gracias a la naturaleza de su composición cerámica son resistentes a la acción de los gases ácidos. La rigidez de su estructura hace que no sea necesario ningún tipo de soporte. Suelen estar hechos por carburo de silicio, alúmina, mullita, etc. Aunque estos no son los más usados debido a que presentan pérdidas de carga importantes.

- Ciclones:

En los ciclones se crea una fuerza centrífuga suficiente para poder separar las partículas de la corriente de gas por la que fluyen. Como se muestra en la figura X, el aire cargado con las partículas entra por un conducto situado en la parte superior izquierda, este flujo como se ha mencionado antes se introduce a una elevada velocidad angular creando así una fuerza centrífuga en las partículas superior a la fuerza gravitacional. Gracias a este fenómeno las partículas se separan del flujo de gas y se extraen por la parte inferior del ciclón formando una espiral concéntrica

I. Introducción

hacia abajo. Al mismo tiempo el aire libre de estas partículas 'aire limpio' sale por el conducto central superior.

La eficacia de este método depende fundamentalmente del tiempo medio de residencia de las partículas en el separador, y de que estas sean capaces de llegar a la pared del separador durante este intervalo de tiempo.

Aunque solo el uso de los ciclones no es suficiente para lograr los niveles de emisiones vigentes, pueden ser realmente útiles si se aplican etapas previas de eliminación de polvo u otras etapas de tratamiento de gases de combustión.

No requieren de requisitos energéticos altos ya que no se produce ninguna caída de presión a lo largo del ciclón.

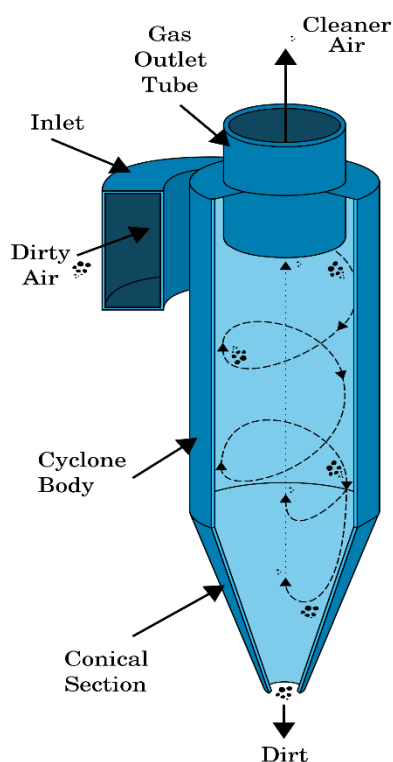


Ilustración 19: Ciclón

I. Introducción

I.4.2.4.2 Técnicas para la reducción de gases ácidos

Cuando se habla de gases ácidos se hace referencia a las emisiones de HCl, HF y SO_x. Este tipo de gases ácidos se eliminan de las corrientes de los gases de combustión mediante el uso de reactivos alcalinos. Se distinguen tres tipos de procesos:

- **Procesos secos:**

Los métodos secos están basados en la introducción de reactivos sólidos básicos en la corriente gaseosa principal para la neutralización de los ácidos contaminantes. Debido a que la reacción gas-sólido es un proceso lento, el tiempo de contacto debe ser el adecuado, pero no excederse demasiado ya que sino el tamaño de la instalación sería inviable. Por lo que los materiales utilizados deben de tener sistemas de granulometría y una reactividad apropiada.

Se llaman procesos secos ya que el producto resultante de la reacción es completamente seco y estable químicamente, lo que hace que su posterior eliminación sea mucho más sencilla. Aunque cabe destacar que es una tecnología con una baja eficacia lo que limita su empleo.

- **Procesos húmedos:**

Se llaman procesos húmedos debido al contacto entre el gas y la solución acuosa que forman los reactivos básicos. El contacto entre el flujo de gas y la fase líquida se realiza en el interior de una torre, creándose así unas reacciones de neutralización en fase líquida. Si el área de contacto entre las dos fases es la adecuada estas se llevarán a cabo de forma rápida y aportando un alto rendimiento al proceso. Debido a su sencillez de operación, su bajo coste y su efectividad es una de las técnicas más extendidas en las plantas incineradoras, pero no hay que olvidar uno de los principales inconvenientes, y es que en los procesos húmedos se requiere de una depuración de las aguas resultantes que han sido contaminadas

- **Procesos semisecos:**

En este tipo de métodos los gases de combustión a tratar entran en contacto con el agente neutralizante, el cual está en forma de solución acuosa (lechada de cal) o en suspensión (en forma de pasta aguada). Mediante el uso de inyectores se realiza el aporte

I. Introducción

del agente básico formando una nube de gotas finas en la corriente gaseosa. Al mismo tiempo que se produce la reacción de neutralización el agua utilizada para la formación de la lechada se va evaporando, produciendo así un aumento de la humedad de los gases y un descenso de la temperatura en el proceso.

El absorbente entra en contacto con los gases de combustión, absorbiendo a su paso los contaminantes ácidos, mientras que, la evaporación del agua tiene como consecuencia la formación de sólidos secos que deben ser eliminados. Se pueden conseguir retenciones del 95% para el HCl y el HF, y del 75% para el SO₂. Es una opción cada vez más usada ya que no genera aguas residuales.

I.4.2.4.3 Tratamiento de los Óxidos de Nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno surgen tanto por la oxidación del nitrógeno combustible como por la oxidación del nitrógeno del aire sometido a las altas temperaturas que el proceso de combustión llega a alcanzar (NO_x térmico). Este NO_x térmico se puede reducir mediante el control de la combustión, por ejemplo, si se consigue disminuir la temperatura de llama. El proceso de combustión se puede dividir en dos etapas, en la primera se libera y recombina el nitrógeno combustible como N₂ debido a la escasez de oxígeno. Mientras que, en la segunda, se adiciona oxígeno necesario para completar el proceso de combustión, eliminando así el nitrógeno de constitución. Mediante la puesta en marcha de este sistema, con quemadores de diseño especial para disminuir los NO_x, sistemas especiales de recirculación del gas para provocar la desnitrificación y un debido control del oxígeno se pueden llegar a conseguir eficacias del 50% en la eliminación del NO_x.

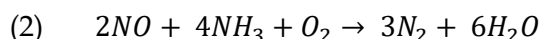
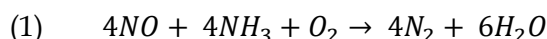
Como se ha mencionado en anteriores apartados, una buena mezcla de los residuos de alimentación es fundamental para que el proceso de combustión sea el adecuado, cuanto más homogénea sea la alimentación de la cámara más fáciles serán de reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno.

Hay que tener en cuenta para poder respetar los niveles establecidos por la Directiva 2000/76/CE son necesarias una serie de medidas secundarias basadas en la aplicación de amoníaco o derivados (urea) como agentes reductores, ambos en

I. Introducción

soluciones acuosas. Los óxidos de nitrógeno, normalmente en forma de NO y NO₂, presentes en los gases de combustión serán reducidos a N₂ y vapor de agua gracias a los agentes reductores.

Las ecuaciones de reducción serán:



Se pueden diferenciar dos tipos de procesos para la eliminación de nitrógeno de los gases de combustión: La Reducción No Catalítica Selectiva (RNCS) y la Reducción Catalítica Selectiva (RCS).

- RNCS: En este tipo de procesos los óxidos de nitrógeno se eliminan mediante una reducción no catalítica selectiva. En el horno se inyecta el agente reductor, normalmente amoníaco o urea, para que este reaccione con los óxidos de nitrógeno. Estas reacciones ocurren a altas temperaturas, entre los 850 y los 1000°C, con una variación de la velocidad de reacción dentro de este rango.

Se considera un proceso selectivo debido a que el reactivo puede reaccionar con varios componentes de los gases de combustión.

En este tipo de procesos surge un fenómeno llamado fuga de amoníaco, esto sucede ya que en la mayoría de los casos donde se utiliza esta técnica se requiere una mayor adición de agente reductor, esto puede producir emisiones de amoníaco. En la *Ilustración 20* se muestra la relación entre la reducción de NO_x, la fuga de amoníaco y la temperatura de reacción.

I. Introducción

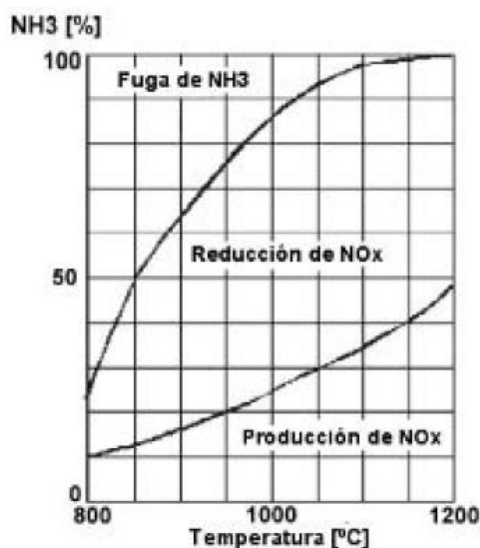


Ilustración 20: Relación entre reducción de NOx, producción, fuga de amoníaco y temperatura de reacción para el proceso de RNCS

Para que el proceso de RNCS sea lo óptimo posible es importante que se realice una mezcla eficaz de los gases de combustión con el reactivo, además de poder contar con el suficiente tiempo de residencia del gas para que se produzca la reducción del NOx.

-RCS: En este proceso catalítico al gas de combustión se le agrega una mezcla de amoníaco y aire, el cual actúa como agente reductor, al gas de combustión. La mezcla pasa a través de un catalizador, haciendo así que el amoníaco reaccione con el NOx dando como productos nitrógeno y vapor de agua.

El rango de temperatura óptimo para que el catalizador cumpla su función va de los 180 a los 450°C. Aunque en la mayoría de incineradoras de residuos operan en el rango de 230-300°C. Por debajo de los 250°C se requeriría de un mayor volumen de catalizador y aumentarían los riesgos del proceso.

En la incineración de residuos, el proceso de RCS se aplica en la zona de gas limpio, después de la eliminación de polvo y gases ácidos. Es por ello por lo que los

I. Introducción

gases de combustión requieren de un recalentamiento hasta alcanzar la temperatura de reacción efectiva del sistema de RCS. Aunque si el SO_x ha sido reducido antes de su entrada a la sección de RCS, este recalentamiento puede reducirse o hasta omitirse.

I.4.2.4.3 Técnicas para la reducción de emisiones de Hg

El mercurio se transfiere muy fácilmente a la corriente de gases de combustión debido a su alta volatilidad. Por esta razón la directiva sobre la incineración de residuos ha marcado un valor límite de 0,05mg/m³, el cual disminuye a 0,03mg/m³ en algunos Estados Miembros. Para poder cumplir con esta normativa la mayoría de las plantas incineradoras han tenido que implementar medidas de limpieza de gases especiales para Hg.

- Técnicas primarias

La mejor forma de reducir las emisiones de Hg a la atmosfera es mediante las técnicas primarias, es decir, las que se encargan de prevenir y controlar la inclusión de mercurio en los residuos a incinerar. Esto se puede realizar de varias formas:

-Mediante la recogida selectiva de los residuos que contienen metales pesados.

-Notificando a los productores de residuos la necesidad e importancia de separar el mercurio del resto de residuos.

-Mediante la identificación u restricción de residuos que contengan trazas o restos de mercurio. Para ello se deben utilizar técnica como el muestreo o el análisis.

A parte de todas estas precauciones que se deben de tomar antes de que el alimento entre a la planta incineradora, si se tratan residuos que puedan contener mercurio, se deberá realizar una adición controlada para evitar sobrecargar la capacidad de eliminación de mercurio del sistema.

I. Introducción

- Técnicas secundarias

El proceso seleccionado para la eliminación de mercurio dependerá fundamentalmente de la carga alimentada y la cantidad de cloro en la materia de combustión. Si el contenido de cloro es elevado, el mercurio que se encuentre en el gas de combustión se encontrará en forma iónica, que puede depositarse en lavadores húmedos.

Mientras que el mercurio metálico puede eliminarse de la corriente de gases de combustión mediante la transformación en mercurio iónico agregando oxidantes, y su posterior deposición en el lavador, o bien su deposición directa sobre carbón activado dopado con azufre, coque de horno de solera o zeolitas.

Cabe recalcar que las dioxinas, cuyas emisiones deben estar también reguladas, pueden eliminarse junto con el mercurio mediante la adsorción de estos sobre carbón activado (deposición directa).

II. OBJETIVOS

OBJETIVOS

II. Objetivos

II.1. Objetivo general

El objetivo principal de este proyecto es el diseño de una planta incineradora de residuos sólidos urbanos, capaz de tratar 49.000.000 kg anuales de desechos provenientes de las comarcas de l'Alcoià y el Comtat. Tratando así con la basura de 137.289 habitantes en total.

Mediante un horno de parrilla se realizarán los procesos de combustión necesarios para la reducción de dichos residuos y la creación de energía a partir de ellos. Los cálculos del proyecto no serán más que una serie de balances de materia y energía del horno de combustión. Tanto para conocer los flujos de entrada y salida del horno y sus correspondientes composiciones como para conocer la energía eléctrica necesaria para hacer funcionar el proyecto.

No hay que olvidar que el objetivo de este proyecto no es el de obtener beneficios a partir de la incineración de residuos, sino el de poder ser lo más autosuficiente posible, que con la energía que se genere al menos se pueda alimentar al horno de combustión. La creación de este proyecto nace como una optativa a los vertederos, mucho más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

II. Objetivos

II.2. Objetivos Particulares

Para poder conseguir el anterior reto se marcan una serie de directrices a seguir:

1. Realizar un estudio exhaustivo sobre el funcionamiento de las plantas incineradoras de residuos y saber qué papel desempeñan actualmente en los diferentes países en los que se encuentran en funcionamiento.

2. Estudiar de la ubicación final de la planta y justificarlo

3. Determinación de la cantidad de residuos a tratar anualmente, este es el dato más importante de este trabajo ya que según la masa de alimentación las dimensiones de la planta varían, y con ellas las limitaciones e índices de cada proceso.

4. Estudio del volumen y el área necesarios para poder tratar la cantidad de residuos sólidos urbanos en cuestión.

5. Selección del horno de combustión y de las diferentes tecnologías que se van a usar en el proyecto

6. Cálculo y análisis de todas las corrientes que entran y salen del sistema

7. Estudio económico y de viabilidad de la planta incineradora de RSU para las comarcas a tratar.

**III. DESARROLLO DEL
PROYECTO**

**DESARROLLO
DEL PROYECTO**

III. Desarrollo proyecto

En este apartado, primero se elegirá una localización para la planta y se mostrarán los argumentos en los que se ha basado esta elección. A continuación, se mostrará la cantidad de residuos a tratar y su lugar de procedencia, como es evidente los residuos que lleguen a la planta provendrán de poblaciones cercanas a esta. Una vez llegados a este punto se explicarán la elección de los procesos y la maquinaria para nuestra planta incineradora en concreto

III.1. Localización

Hay una serie de requisitos que se han tenido en cuenta a la hora de elegir el terreno. En este caso la zona ya está acotada, ya que como se he mencionado anteriormente si se tratan los residuos procedentes de las comarcas de l'Alcoià/Comtat y alrededores, la planta incineradora deberá instalarse cerca de estos lugares. A continuación, se muestra una imagen del terreno donde se va a situar la planta vista desde un satélite.

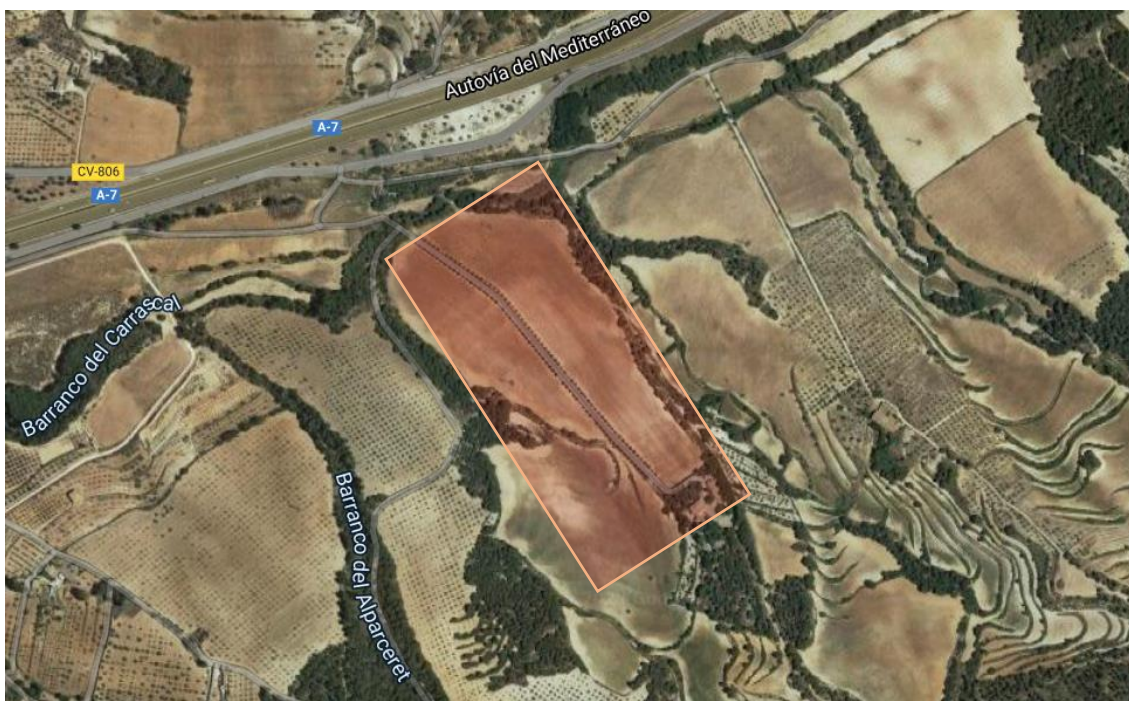


Ilustración 21: Vista satélite del terreno donde se situará la planta incineradora de RSU

III. Desarrollo proyecto

Los puntos más importantes en los que se va a basar la elección del terreno son:

1. Una climatología favorable, es decir que en el terreno a escoger no haya acuíferos subterráneos, y que la climatología sea mayormente favorable (zonas con bajas y regulares precipitaciones para poder evitar inundaciones). Además, hay que tener muy en cuenta los vientos predominantes, una planta incineradora está constantemente generando una serie de emisiones, olores y polvos; por ello se debe elegir un terreno cuyos vientos predominantes no pasen por ningún núcleo urbano. La instalación no solo debe estar lo suficientemente alejada de las poblaciones, sino que también sus emisiones no deben de llegar a ellas.

2. Que sea geológicamente estable, es muy importante saber que el terreno sobre el que se va a situar el complejo es el adecuado. El suelo debe ser un impermeable natural y sin pendiente, el grosor de los sedimentos arcillosos debe superar los 5 metros, las áreas poseer estabilidad geotécnica y un bajo riesgo sísmico, y el impacto paisajístico debe ser el mínimo. Como es de lógica no se puede situar cerca de parques naturales ni zonas de especial interés ecológico.

3. Factores socioeconómicos. Realizar este tipo de instalaciones suele levantar polémicas, por este motivo el factor socio económico se ha de tener muy en cuenta a la hora de situar la planta. El funcionamiento de este tipo de tecnologías genera molestias por ruidos y olores, por lo que deben estar lo suficientemente alejadas de los núcleos de población. Pero sí relativamente cerca de los núcleos industriales, grandes generadores de residuos. Además, la planta debe tener fácil acceso y estar bien comunicada con carreteras nacionales para que los camiones que transporten los residuos no tengan problemas a la hora de acceder a ella. El hecho de que la planta este bien comunicada favorecerá también el acceso del agua y la electricidad

Como se puede ver en la *Ilustración 21*, la localización elegida está lo suficientemente aislada como para no suponer ningún problema a los ciudadanos de dichas comarcas, pero lo suficientemente cerca de dos de los mayores núcleos urbanos de la zona como son Alcoy e Ibi. Además, se encuentra muy cerca de la autovía del mediterráneo, lo que le aporta una muy buena comunicación a la planta.

III. Desarrollo proyecto

III.2 Volumen de residuos a tratar

En este capítulo se realizará un estudio sobre la cantidad de los residuos a tratar, su lugar de procedencia y de qué suelen estar formados los flujos de materia que entran día a día a las plantas incineradoras.

Como bien indica el Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana (PIRCV), el mejor indicador para el cálculo de la producción de RSU es la tasa o ratio de generación, expresado en kilogramos de residuos producidos por habitante y día (Kg/hab.día). En la *Tabla 7* se muestran las tasas de generación de residuos urbanos pertenecientes a los años 2002, 2003 y 2004 en las diferentes provincias de la Comunidad Valenciana, esto sirve para poder tener una visión general sobre la cantidad de residuos que se producen en una comunidad autónoma española.

RATIOS DE GENERACIÓN (kg/hab.día)				
Provincia	2002	2003	2004	PROMEDIO
ALICANTE	1,44	1,50	1,54	1,50
CASTELLÓN	1,55	1,58	1,61	1,58
VALENCIA	1,27	1,28	1,31	1,28
COMUNITAT VALENCIANA	1,37	1,40	1,43	1,40

Tabla 7: Tasa de generación de residuos urbanos en el periodo 2002-2004 en función de la carga de población y su promedio (Kg/hab.día)

Hay que tener en cuenta que la tasa de generación es de tendencia creciente, es decir, si no se aplicaran medidas para reducir la generación de residuos o no se hiciera más hincapié en la recogida separada de residuos, la tasa iría a aumentado con el paso

III. Desarrollo proyecto

del tiempo. Gracias a las políticas aplicadas al tratamiento de residuos la tasa unitaria de generación se ha mantenido constante en los últimos 15 años.

En la planta incineradora de este proyecto la alimentación provendrá de las comarcas de l'Alcoià y el Comtat, por lo que para saber la cantidad de Kg/año a tratar se partirá de los 1,50 Kg de residuos/hab.día que se generan en la provincia de Alicante.

Los cálculos para la obtención de la cantidad final de residuos que se traten en un año son muy sencillos. Primero se multiplican los 1,50 Kg/hab.día por el número de habitantes que forman las dos comarcas en cuestión (137.289 habitantes en el 2019). Y a continuación, este dato se multiplica por los 365 días del año, para así poder tener la cantidad de basura total generada anualmente.

$$137.289 \text{ (habitantes)} \cdot 1'5 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{hab.día}} \right) = 205933,5 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{día}} \right) \cdot 365 \left(\frac{\text{día}}{\text{año}} \right) = 75.165.727'5 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{año}} \right)$$

Aquí se engloban todos los residuos que puede generar una persona, pero solo el 65% de los 17.165.727,5 son adecuados para este tipo de tratamiento térmico. La materia orgánica, los metales, el textil, la madera y otro tipo de residuos forman el 65% de la materia apta para ser incinerada en la planta. Excluyendo materiales como el papel y el cartón, el plástico y el vidrio, que conformarían el 35% restante.

Por lo que aplicando el 65% la cifra disminuiría de la siguiente forma:

$$75.165.727'5 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{año}} \right) \cdot 65\% = 48.857.722'88 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{año}} \right) \rightarrow 48.857'72288 \left(\frac{T}{\text{año}} \right)$$

Hay que tener en cuenta que las plantas incineradoras no trabajan las 24 horas del día los 365 días del año debido a posibles averías, revisiones, limpiezas o cualquier inconveniente que se pueda presentar. Por ello se supondrá que la planta trabaja alrededor de 8000 horas al año, dejando así unos días de margen, esto equivale aproximadamente a los 329 días del año.

De la cantidad de basura total que se genera en un año, a la planta entraran 6'10722 Toneladas cada hora

III. Desarrollo proyecto

$$\frac{48.857'72288 T \text{ Totales}}{8000 \text{ horas}} = 6'10722 \left(\frac{T}{\text{hora}}\right)$$

III.3 Selección de equipos y tecnologías para la planta

III.3.1 Equipo de combustión

Como se ha explicado en el punto I.4.2.2 Tratamiento Térmico hay una serie de sistemas de combustión aptos para la incineración de los residuos sólidos, las incineradoras de parrilla, los hornos rotatorios y los hornos de lecho fluidizado.

Los hornos de parrilla forman el sistema hasta ahora más usado en la combustión de residuos sólidos urbanos, por lo tanto, será el seleccionado para este proyecto. A diferencia de los rotatorios y los de lecho fluidizado las incineradoras de parrilla combinan versatilidad, amplia capacidad de tratamiento y bajo coste de operación.

Cuando se habla del término amplia capacidad se refiere a que la masa de alimentación es mucho mayor que la de otras tecnologías. Por ejemplo, mientras que los hornos de lecho fluidizado solo admiten 20 t/h los de parrilla admiten un rango de entre 5 y 30 t/h.

En términos económicos esta es la mejor de las opciones, ya que no solo presenta bajos costes de operación, sino que también de inversión, esto se debe a que los residuos que se vayan a tratar no requieren de un pretratamiento, los hornos de parrilla admiten un amplio rango de partículas.

El sistema de refrigeración es también un factor importante que seleccionar. A pesar de que la mayoría de las parrillas son refrigeradas con aire, a veces se utiliza agua. El uso del agua como agente refrigerante conlleva una serie de ventajas lo que implica una estructura más compleja. Permite un mayor control sobre la temperatura del metal de la parrilla y sobre la temperatura de combustión local. Es decir, una mejora en el

III. Desarrollo proyecto

rendimiento de la operación. Además, gracias al mayor control sobre la temperatura de la parrilla, se podrán tratar residuos con mayor poder calorífico sin que haya problemas adicionales.

Todas estas ventajas justifican que en este proyecto se haya elegido un sistema de refrigeración mediante agua.

La empresa Babcock & Wilcox (B&W), es una de las empresas con más renombre en el mundo de la revalorización de residuos, o como es más conocido globalmente el Waste to Energy (de residuo a energía). Se dedican desde hace años a la producción de maquinaria y tecnología de esta rama de la ingeniería, siendo sus principales objetivos el respeto al medio ambiente, la rentabilidad y el aprovechamiento de toda la energía. Esta empresa ofrece un horno de parrilla llamado DynaGrate® el cual cumple con todas las ventajas mencionadas anteriormente y además cuenta con la capacidad de poder ser refrigerado tanto por agua como por aire. Este horno de parrilla tiene un rango de capacidad de 4 a 55 t/h y es capaz de tratar residuos con poderes caloríficos de hasta 25 MJ/kg. A continuación, en la *Ilustración 22* se muestra una imagen proporcionada por la misma empresa de este tipo de sistema de combustión.

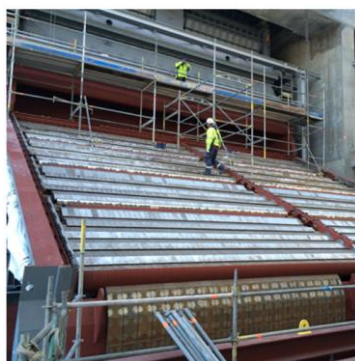


Ilustración 22: Horno de Parrilla DynaGrate

En cuanto a la estructura del horno existen tres tipos de distribuciones, los hornos de flujo paralelo, caracterizados por su alta eficiencia en la combustión y por ser lo más adecuados para residuos con alto poder calorífico; los hornos a contraflujo; y los hornos de flujo central, capaces de admitir residuos de composición muy variada. En este caso se han seleccionado una configuración de flujo central, ya que es la que más se adapta a

III. Desarrollo proyecto

las características del proyecto y además consta con la estructura más simple, por lo que además será el más económico.

III.3.2 Equipos para el tratamiento de gases de combustión (TGC)

Aunque cada vez se está apostando más por el pretratamiento de los residuos con el fin de disminuir la emisión de partículas y gases contaminantes, es muy importante que la selección del equipo para el TGC (Tratamiento de gases de combustión) sea el adecuado. El éxito está en conseguir un equilibrio entre eficiencia y rentabilidad, cumpliendo sobre todo con las normativas vigentes.

En los siguientes apartados se mostrará cuáles son los sistemas elegidas y su debida justificación

III.3.2.1 Reducción de partículas presentes en los gases

Existen varias tecnologías para la reducción de las partículas que fluyen en los gases de combustión, al inicio del proyecto se ha explicado el funcionamiento y las características principales de los precipitadores electrostáticos, los filtros de manga y los cerámicos, y los ciclones.

La eliminación de partículas presentes en los gases debe establecerse como una primera etapa en el TGC. Muchos de los equipos cuyo objetivo es el de la emisión de gases no contaminantes trabajan de forma mucho óptima si en la alimentación no hay presencia de partículas, situando un equipo de eliminación de partículas en primera estancia se reducirá la cantidad de partículas que entren a los equipos posteriores.

Se considerará también la aplicación de una etapa final, los gases antes de ser emitidos a la atmosfera deberán pasar por una última etapa para asegurar la eliminación óptima de cualquier partícula que quede presente. Debido al uso de estas dos etapas en la eliminación de partículas se alcanzarán los límites de emisión, optimizando al mismo tiempo el uso de energía.

III. Desarrollo proyecto

El hecho de introducir el proceso de separación de partículas de los gases de combustión a través de una etapa inicial y una final hace que el precipitador electrostático (PE) sea la mejor alternativa. Su consumo energético es el menor de todas las opciones, además es el más económico si lo que se pretende es que esté por duplicado. Por el contrario, si solo hubiera una parte del proceso basada en la eliminación de partículas se implementaría un filtro de manga cuya eficiencia es más elevada.

En conclusión, las ventajas por las que se ha elegido el PE son: alta eficiencia en dos etapas; baja caída de presión, lo que evita problemas adicionales en el proceso; ahorro final de energía; y rentabilidad económica.

En este caso la empresa Babcock & Wilcox (B&W) será también la encargada de proporcionar dichos equipos.

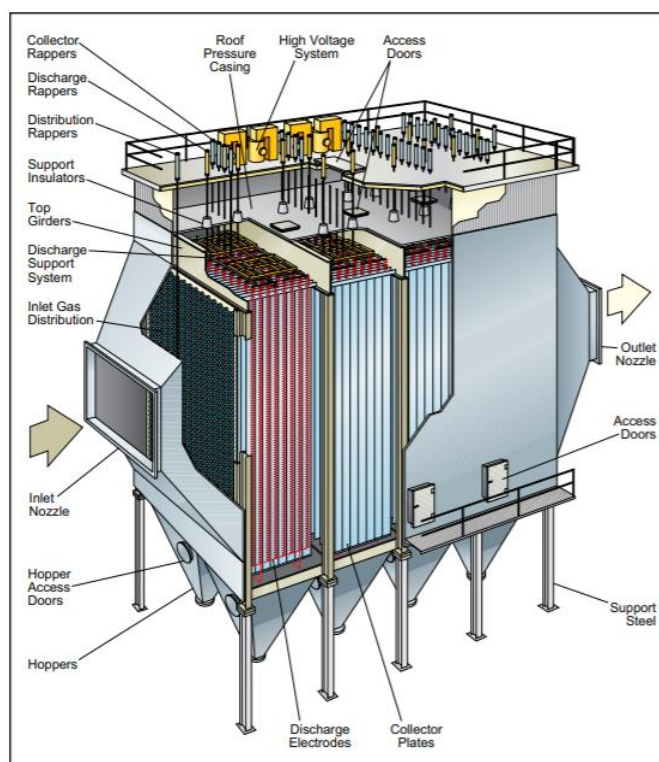


Ilustración 23: Precipitador electrostático de B&W

III. Desarrollo proyecto

III.3.2.1 Reducción de gases ácidos

El sistema que elegir para la reducción de los gases ácidos será aquel cuyo consumo de energía sea menor, sin olvidar claro el principal objetivo, reducir las emisiones de gases ácidos a la atmósfera.

Según varias recomendaciones publicadas en el documento BREF sobre el tratamiento de residuos, una de las mejores alternativas es la de la instalación de un sistema semihúmedo con recirculación de residuo. De este modo se consigue un consumo de energía asequible y, además, gracias a la recirculación de parte de los residuos se consigue también un ahorro en el consumo de reactivos.

Al tratarse de un sistema semihúmedo se usará cal hidratada como reactivo, esto se tendrá en cuenta para los cálculos posteriores.

En primer lugar, se instalará un atomizador rotativo, encargado de inyectar el reactivo, la cal, en la corriente caliente del gas para así absorber los contaminantes ácidos presentes en él. El sistema elegido en concreto es el proporcionado por la empresa GEA, especializada en tecnologías de ingeniería industrial, el sistema en cuestión se llama 'GEA Niro Spray Dryin Absorption (SDA)'. Este sistema cuenta con dispersores de gas, muy útiles a la hora de distribuir el gas dentro de la cámara del absorbedor, facilitando así el contacto entre gas y reactivo.

Tanto el atomizador como los dispersores se encontrarán dentro de la cámara del absorbedor, de forma cilíndrica y con un fondo cónico, su estructura se puede observar en la siguiente imagen.

III. Desarrollo proyecto

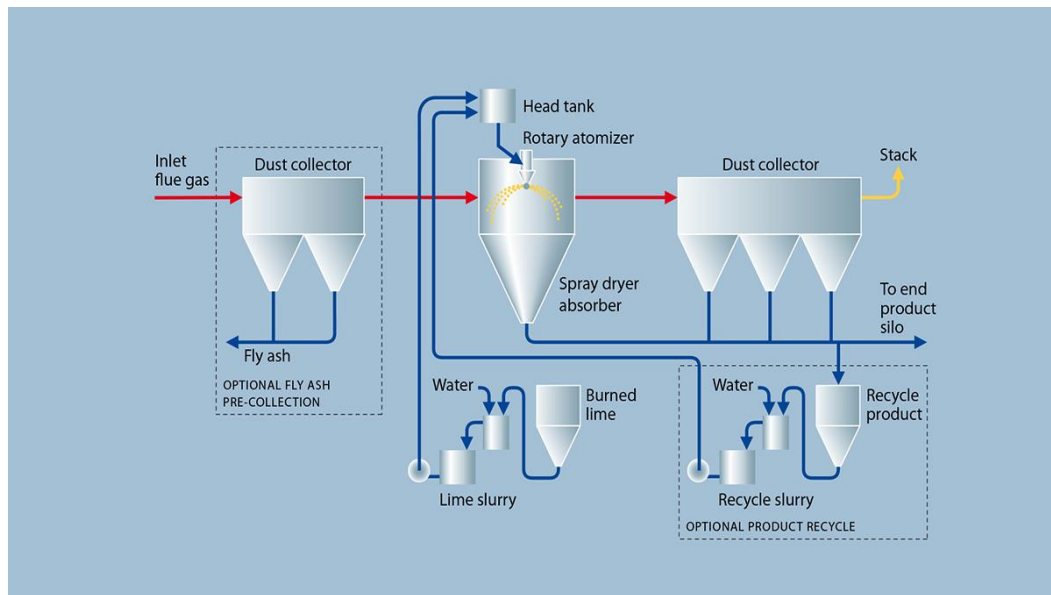


Ilustración 24 : GEA Niro Spray Dryin Absorption (SDA)



Ilustración 25: Atomizador Rotativo GEA Niro patentado

III.3.2.1 Reducción de emisiones de NOx

En el punto I.4.2.4.3 Tratamiento de los Óxidos de Nitrógeno, se muestran los dos sistemas para la reducción de los NOx, la Reducción Catalítica no Selectiva (RNCS), y la Reducción Catalítica Selectiva (RCS). Para nuestra instalación se elegirá el sistema RNCS ya que tanto su consumo energético como sus costes de operación y de inversión son menores.

III. Desarrollo proyecto

La empresa responsable de proporcionar un sistema de RNCS se llama Valmet con hasta un 70% de eficacia, es una empresa que reúne eficiencia y ahorro económico.

En este sistema se inyectará urea como reactivo en el interior del horno. La urea se mezclará con el flujo caliente de gases, reaccionando así con el NO y el NO₂ y produciendo N₂ y H₂O.

Otra de las ventajas con las que cuenta el sistema de RNCS de Valmet es su capacidad de adaptación, es decir, que el sistema puede instalarse en calderas nuevas o adaptarse a calderas ya existentes, esta misma empresa cuenta con docenas de instalaciones con un alto rendimiento.

III.4 Cálculos realizados

Los cálculos que se puedan realizar en el diseño de una planta incineradora de residuos industriales se pueden englobar en una serie de balances de materia y energía. Conociendo las composiciones de los flujos de entrada, las reacciones de combustión, los poderes caloríficos de cada componente, los múltiples parámetros de los que depende el proceso, y haciendo uso de los distintos balances se obtendrá la potencia eléctrica necesaria, el aire necesario para la combustión, el consumo de reactivos y la composición de emisiones a la atmosfera.

III.4.1 Balances de Materia

A continuación, se procederá a realizar los cálculos pertenecientes al balance de materia del horno de combustión. Se disponen de 5 corrientes en total, 3 de entrada y 2 de salida, por lo tanto, el primer paso será el de establecer las composiciones de los 3 flujos de entrada al horno. En este caso se ha definido la corriente 1, como la corriente de metano necesario para la reacción; la 2, como los residuos que van a ser incinerados; y la 3 la cantidad de aire necesario para la combustión.

III. Desarrollo proyecto

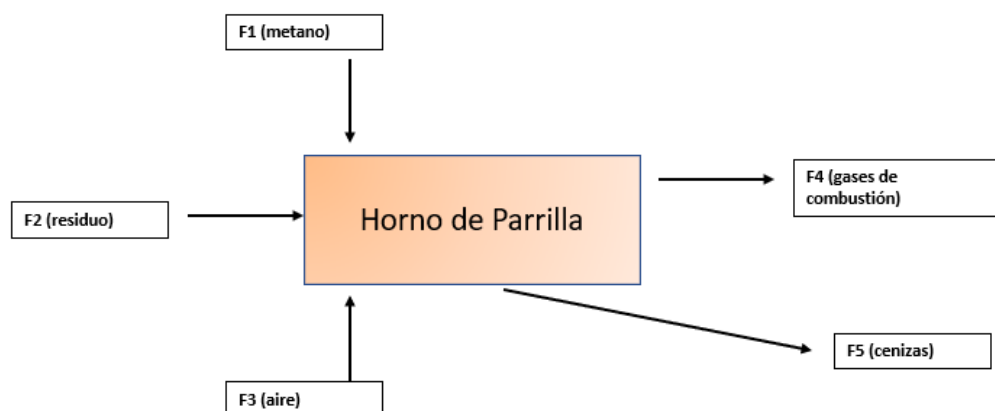


Ilustración 26: Esquema del horno incinerador y sus correspondientes entradas y salidas

Cómo se puede observar en la *Ilustración 26*, las corrientes 4 y 5 corresponden respectivamente a los gases de combustión y las cenizas resultantes.

III.4.1.1 Entrada de residuos y su composición

En el Punto III.2 Volumen de residuos a tratar, se muestra la cantidad de residuos a procesar en la planta, por lo que el siguiente paso será el de averiguar la composición de dicha alimentación. En el documento BREF se muestra el porcentaje de cada elemento presente en una corriente de RSU, *Tabla 8*.

III. Desarrollo proyecto

Componente	%	% Recalculado para la entrada
C	39,03	57,39
H	5,14	7,56
N	0,46	0,68
S	0,14	0,21
Cl	0,11	0,16
O	23,13	34,01
Cenizas a 750°C	32,00	0

Tabla 8: Composición de los RSU que entran a la planta

Conocido el porcentaje correspondiente a cada elemento, su masa molar, y los kg/h de alimentación se obtienen los kg/h y los kMoles/hora que entran de cada componente al horno. Es necesario recalculer el porcentaje de entrada de elementos ya que en este caso no se tiene en cuenta la entrada de cenizas. El cálculo para la obtención tanto de los kg/h como de los kMoles/hora es muy simple, a continuación, se muestran los cálculos realizados para el Carbono, el procedimiento es el mismo para el resto de los elementos.

$$\% \text{ de Carbono en la corriente 2} \cdot \text{alimentación de residuos} \left(\frac{\text{kg}}{\text{hora}} \right) = \text{Carbono en la corriente 2} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{hora}} \right)$$

$$\frac{\text{Carbono en la corriente 2} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{hora}} \right)}{\text{Masa molar} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right)} = \text{Carbono corriente 2} \left(\frac{\text{Kmoles}}{\text{hora}} \right)$$

Realizando los anteriores cálculos para cada elemento en una hoja de cálculo se obtienen los flujos másicos de cada elemento que entran con la alimentación, mostrados en la

Tabla 9.

III. Desarrollo proyecto

composición elementos	kg/hora elemento a la entrada	kMoles/hora a la entrada
C	3504,85	292,07
H	461,57	461,57
N	41,31	2,95
S	12,57	0,39
Cl	9,88	0,28
O	2077,05	129,82
cenizas	-	-
TOTAL (SIN CENIZAS)	6107,22	887,07

Tabla 9: Flujos máxicos de los elementos que forman los RSU

III.4.1.2 Entrada de combustible CH₄

Para que la reacción de combustión se realice en el interior del horno de la manera adecuada, es necesaria la adición de un combustible que lo facilite. En este horno como en la mayoría presentes en las plantas incineradoras se utilizará metano (CH₄), introducido en el horno como la corriente de entrada F1.

Como está establecido en el BREF al horno entran 10 m³ por tonelada de residuo de gas metano, a continuación, transformaremos el volumen de gas a kg, conociendo los datos que se muestran en la *Tabla 10*.

gas combustible (CH ₄)	10	m ³ /tonelada de residuo
volumen 1 kMol en C.N (m ³)	22,4	m ³
1 kMol	1000	moles
masa molecular (CH ₄)	16	kg/kmol
1 tonelada	1000	kg

Tabla 10: Características del combustible

$$\frac{10 \text{ m}^3}{\text{ton. de residuo}} \cdot \frac{1 \text{ kmol}}{22,4 \text{ m}^3} \cdot \frac{16,04 \text{ kg}}{1 \text{ kmol}} = 7,1428 \frac{\text{kg de CH}_4}{\text{ton. de residuo}}$$

III. Desarrollo proyecto

$$7,1428 \frac{\text{kg de } CH_4}{\text{ton. de residuo}} \cdot \frac{1 \text{ ton de residuo}}{1000 \text{ kg}} = 0,007142 \frac{\text{Kg}}{\text{hora}} \text{ de } CH_4 \text{ por kg de residuo}$$

A continuación, una vez obtenido el valor de kg/hora de CH₄ por kg de residuo y multiplicando a este por los kg de residuos generados cada hora, se obtiene el valor los kg/hora de metano necesario. Y con este a su vez se obtienen los kMoles/hora de metano.

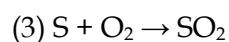
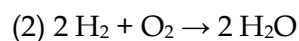
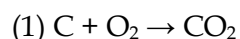
$$0,007142 \frac{\text{Kg}}{\text{hora}} \text{ de } CH_4 \text{ por kg de residuo} \cdot 6107,22 \frac{\text{kg}}{\text{hora}} \text{ de residuos} = 43,623 \frac{\text{kg}}{\text{hora}} \text{ de } CH_4 \text{ necesario}$$

$$\frac{42,623 \frac{\text{kg}}{\text{hora}} \text{ de } CH_4}{16 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kMol}} \right)} = 2,726 \frac{\text{kMoles}}{\text{hora}} \text{ de } CH_4 \text{ necesario}$$

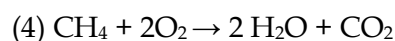
Por lo que ya se conoce el flujo de metano en Kg/hora y en kMol/hora, necesario para la combustión de los residuos recibidos en la planta.

III.4.1.3 Determinación del exceso de aire

Como ya se explicó anteriormente la combustión de los deshechos se produce con un exceso de aire, en este apartado se realizará un cálculo del aire necesario para la combustión de los RSU. Del aire que se aporte dependerá la cantidad de oxígeno disponible, las relaciones estequiométricas son las siguientes:



En la última ecuación se le añade el CH₄ necesario para la combustión, cuya cantidad necesaria se ha desarrollado en el apartado anterior.



Haciendo uso de las relaciones estequiométricas se obtiene la cantidad de O₂ (kMoles) para cada reacción, y con la suma de todos estos valores el oxígeno total

III. Desarrollo proyecto

necesario. Hay que tener en cuenta que los residuos a tratar ya cuentan con un porcentaje de oxígeno, por lo que al O_2 estequiométrico se le deberá restar el O_2 que aportan los mismos residuos. Una vez conocido el oxígeno teórico necesario para la reacción de combustión se podrá conocer la cantidad de aire que hay que suministrarle al horno, aunque hay que tener en cuenta que este aire es estequiométrico, como el proceso trabaja con un exceso de aire, será la suma de ambos la cantidad de aire real que hay que añadir en el horno.

Para los siguientes cálculos se va a trabajar con un exceso de aire (EA) del 1,35, aunque el rango puede ir desde 1,2 hasta 1,5. Haciendo uso de este exceso de aire y de valores como la masa molar del aire (28,98 kg/kMol), y la proporción de oxígeno en el aire (0,21) se alcanzarán los kMoles de oxígeno real que deben ser suministrados.

$Oxígeno\ real\ (kMol) = (EA \cdot Oxígeno\ teórico\ necesario\ (kMol)) + Oxígeno\ teórico\ necesario\ (kMol)$

Pero como se ha mencionado anteriormente lo que suministramos como corriente de entrada no es oxígeno puro sino aire, por lo que para obtener la cantidad de aire real simplemente se dividirá el oxígeno real entre el porcentaje de oxígeno presente en el aire.

$$Aire\ real\ \left(\frac{kmol}{hora}\right) = \frac{Oxígeno\ real(kMol)}{\% \text{ de Oxígeno en Aire } (0,21)}$$

Como el objetivo es conocer la cantidad de aire necesario en kg/hora, seguidamente se deberá multiplicar el anterior dato por la masa molar del aire para pasar de flujo molar a másico.

$$Aire\ real\ \left(\frac{kg}{hora}\right) = Aire\ real\ \left(\frac{kmol}{hora}\right) \cdot Masa\ Molar\ Aire\ \left(\frac{kg}{kmol}\right)$$

III. Desarrollo proyecto

En la *Tabla 11*, se muestran los valores finales de cada una de estas operaciones.

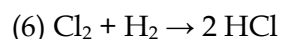
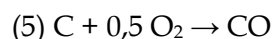
Mr aire (kg/kmol)	proporción oxígeno en aire	kmoles oxígeno real	exceso de aire	kmoles aire real/hora	kg aire real/hora
28,98	0,21	818,7401005	1,35	3898,76	112986,1

Tabla 11: Flujo de aire real

Como la planta incineradora estará operativa 8000 horas al año, la cantidad de aire real necesario será de 903889070,9 kg/año.

III.4.1.4 Gases de combustión

Como en la mayoría de los procesos químicos no solo se forman los productos deseados, sino que también se forman una serie de productos secundarios los cuales deben ser tratados de la manera adecuada. En este caso aparte de los productos formados en las reacciones (1), (2), (3) y (4), también se formará CO (5) y HCl (6).



Para poder conocer la composición y el flujo másico de la corriente F4 (gases de combustión), se debe realizar un balance de materia. Partiendo de la basa que toda masa que entre al horno debe salir del mismo y que en este caso no hay acumulación de materia el balance quedará como: $F1 + F2 + F3 = F4 + F5$.

Las cenizas forman el 32% de la corriente de alimentación por los que para averiguar los kMol/hora de cenizas que salen del horno (F5) se debe aplicar este 32% a la corriente F2, es decir a los kMol/hora de residuo que entran al horno. Teniendo ya definidas todas las corrientes; para el cálculo de los gases de combustión de salida, se despejará el valor de F4 en el balance de materia.

III. Desarrollo proyecto

Con esto ya estarían todas las corrientes del proceso definidas, el siguiente paso sería el de averiguar sus respectivas composiciones.

ENTRADAS	kmoles/hora	kg/hora
Total corriente 1 metano	2,726435429	43,623
Total corriente 2 residuo	887,1	6107,215
Total corriente 3 aire	3898,762383	112986,134
TOTAL	4788,56	119136,97

Tabla 12: Corrientes de entrada al volumen de control

SALIDAS	kmoles/hora	kg/hora
Total corriente 4 gases combustión (68%)	4504,70	117182,66
Total corriente 5 cenizas (32% del residuo)	283,8637144	1954,31
TOTAL	4788,56	119136,97

Tabla 13: Corriente de salida del volumen de control

ENTRADAS:

El agua, el nitrógeno y el carbono son tres de los elementos mayoritarios en las corrientes de entrada al horno, por lo que es importante saber en qué cantidades entran y cómo, ya que el agua, por ejemplo, puede introducirse en el interior del horno tanto por el aire como por el residuo.

- H₂O

El flujo de H₂O introducido a través del aire se obtienen al multiplicar la humedad específica del aire por los kg/hora de aire real que entran al volumen de control.

$$H_2O \text{ introducido en aire } \left(\frac{kg}{hora} \right) \\ = \text{humedad específica aire } \left(\frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire seco}} \right) \cdot \text{flujo aire real introducido } \left(\frac{kg}{hora} \right)$$

Para pasar el dato anterior de flujo másico a molar simplemente se dividirá por la masa molar del agua.

III. Desarrollo proyecto

El agua que se introduce a través del residuo se obtiene de multiplicar los kmoles/hora de entrada de hidrógeno, contenidos en la alimentación de residuos, por la masa molar del agua.

$$H_2O \text{ introducido en residuo } \left(\frac{kg}{hora} \right) \\ = H \text{ presente en la alimentación } \left(\frac{Kmol}{hora} \right) \cdot MMol \text{ Agua } \left(\frac{kg}{kMol} \right)$$

Sumando ambos resultados se obtiene la cantidad de agua total que entra al volumen de control, 8873,1 kmoles/hora de agua introducidos lo que equivale a 493 kg/hora.

- **Nitrógeno**

El nitrógeno al igual que el agua puede entrar al horno a través del aire y del residuo. Los cálculos realizados aquí son muy sencillos, el nitrógeno forma un 79% del aire, por lo que multiplicando este porcentaje por el flujo de aire real que entra al sistema, se obtendría el flujo molar de nitrógeno que entra por aire. La cantidad de nitrógeno que entra por los residuos se muestra en el apartado III.4.1.1 Entrada de residuos y su composición. Sumando ambos valores se obtienen los kMoles totales de nitrógeno que entran al volumen de control. Si multiplicamos este valor por 22,4 que sería el volumen molar en L/mol de gas, se podrá pasar de kMoles totales de nitrógeno a m³ totales; 69058,6 m³ totales de N₂ cada hora.

El propósito final no es el de obtener la cantidad de N₂ en unidades de volumen, sino en unidades de masa (kg), por lo que haciendo uso de la afirmación de Proy de que 1 m³ de nitrógeno equivale a 400 mg de este, se puede obtener el equivalente de los 69058,6 m³ de N₂ en kg, cuyo valor es de 27,623 kg/hora.

- **Carbono**

A diferencia de los anteriores elementos el carbono aparte de por los residuos (calculado en el III.4.1.1 Entrada de residuos y su composición) también se puede introducir a través del metano. Su breve cálculo se muestra a continuación:

$$kMoles \text{ de Carbono presentes en el } CH_4 = CH_4 \text{ entrada } \left(\frac{kg}{hora} \right) \cdot \frac{MMol C \left(\frac{kg}{kMol} \right)}{MMol CH_4 \left(\frac{kg}{kMol} \right)}$$

III. Desarrollo proyecto

La suma de los 32,7 kMoles/hora de C provenientes del metano y los 292,07 kMoles/horas provenientes de los residuos equivale a la cantidad de carbono total que entra al horno, 324,79 kMoles/hora; en unidades de masa, 3897,45 kg/hora.

SALIDAS:

Hasta aquí se han definido todas las corrientes de entrada y sus composiciones, además también se ha mostrado las principales vías de entrada de los elementos mayoritarios presentes en los residuos. A continuación, se va a realizar el mismo análisis, pero para los gases de salida, cuyos cálculos estarán basados en las composiciones obtenidas de los flujos F1, F2 y F3.

El primer paso será averiguar las vías de salida del carbono, es decir, que porcentaje de este sale por las escorias, por las cenizas volantes, etc.

Aunque el carbono es uno de los reactivos del proceso de combustión, no todo este reacciona, sino que hay parte de él que sale como inquemado por las escorias y cenizas volantes, y otra que sale junto los gases CO y CO₂. Según varios análisis realizados a las cenizas procedentes de distintos hornos de incineración, se sabe que el carbono forma un 3,9% de las escorias y un 9% de las cenizas volantes. Asimismo, la empresa especializada en este tipo de tecnología Babcock & Wilcox afirma, según varios estudios realizados, que un 7% del carbono que sale en forma de gas proviene del CO, y el 93% restante proviene del CO₂. Obteniéndose así la porción de carbono que sale como inquemado y la porción de carbono que sale como gas.

En la *Tabla 14*, se muestra con claridad cada uno de estos porcentajes.

		%
salida de carbono	Carbon en escorias (%)	3,90%
	Carbon en cenizas volantes (%)	9,00%
	Carbón en forma de CO (7% de gases)	6,10%
	Carbón en forma de CO ₂ (93% de gases)	81,00%
	TOTAL	100,00%

Tabla 14: Carbono de salida

III. Desarrollo proyecto

Hay que tener en cuenta que parte de las escorias que salen del sistema, es agua, en concreto un 15% del total de las cenizas procedentes del horno. Aplicando este 15% a los kMoles/hora de cenizas que salen por la corriente 5, se obtendrá la cantidad de agua total reducida a cenizas, 42,58 kMoles/hora.

Los flujos de los gases de combustión de salida se especifican en la Tabla 15.

GASES	kmoles/hora	kg/hora	%
CO	19,8023105	554,46	0,473
SO2		25,14	0,021
HCl		20,31	0,017
O2		7525,44	6,422
N2		89259,05	76,171
H2O	8873,1	492,95	0,421
NO		26,24	0,022
NO2		1,3812	0,001
CO2		19277,68	16,451
total		117182,66	100,000

Tabla 15 : Gases de combustión a la salida

Para el cálculo de los kMoles/hora de salida del CO se multiplicará la cantidad de carbono presente tanto en el monóxido como en el dióxido de carbono por el flujo de entrada de carbono, y esto a su vez se multiplicará por el 7% de carbono que proviene del CO.

$$CO\ salida \left(\frac{kMol}{hora} \right) = \left(C\ entrada \left(\frac{kMol}{hora} \right) \cdot (6,10\% + 81\%) \right) \cdot 0,07$$

Algo parecido ocurre en el flujo de salida del NO, en este caso se conoce que el 95% del nitrógeno sale del horno a través del monóxido de nitrógeno, por lo que multiplicando este 95% por los kg/hora de nitrógeno que entran al horno, se obtendrán los kg/horas reales de NO que se emiten. El mismo procedimiento se aplicará para el dióxido de nitrógeno, pero en vez de con un 95%, con un 5%.

El resto de los gases o ya se han explicado antes o se obtienen a partir de una serie de relaciones estequiométricas.

III. Desarrollo proyecto

III.4.1.5 Cálculo de residuos sólidos

Los residuos sólidos que se obtienen en el proceso de incineración se pueden diferenciar en dos grupos, las escorias procedentes del horno y las cenizas volantes. Al conjunto de ambos se les considera cenizas o escorias y son el 32%, que se muestra en la *Tabla 8* del total de residuos que entran al horno incinerador. Por lo que aplicando este porcentaje a los 6107,22 kg/hora de residuos que se introducen en el volumen de control, se obtendrá el flujo de cenizas totales, equivalente a 1954,3 kg/hora.

Como se ha mencionado dentro de este conjunto de cenizas se encuentran también las cenizas volantes, según se muestra en varios estudios forman entre el 9 y el 10% de las cenizas totales. En este caso se opta por coger el valor medio de 9,5%. De este modo aplicando el 9,5% a los 1954,3 kg/hora se logra saber qué cantidad exacta de cenizas volantes hay en el flujo total de cenizas (escorias). Esta cantidad pasará luego al tratamiento de gases de combustión.

Las cenizas procedentes del horno, el 90,5 restante serán eliminadas del sistema por la corriente F5.

La composición de dichas cenizas volantes y escorias se ha obtenido a partir de varios análisis realizados en diferentes plantas incineradoras. En la *Tabla 16* se puede observar el porcentaje que forman cada elemento del total de las escorias procedentes del horno y de las cenizas volantes.

III. Desarrollo proyecto

	% presente en escoria	tn/año	% presente en cenizas volantes	tn/año
SiO ₂	17,02%	2408,19	26,31%	390,78
Al ₂ O ₃	7,17%	1014,50	7,69%	114,22
CaO	34,46%	4875,81	28,70%	426,27
Fe ₂ O ₃	2,46%	348,07	6,02%	89,41
MgO	2,62%	370,71	2,31%	34,31
K ₂ O	5,27%	745,66	2,64%	39,21
Na ₂ O	0,57%	80,65	7,71%	114,51
SO ₃	7,79%	1102,22	4,00%	59,41
P ₂ O ₅	1,98%	280,15	3,13%	46,49
TiO ₂	1,80%	254,69	1,51%	22,43
Carbono inquemado	3,90%	551,82	9,00%	133,67
otros	14,96%	2116,72	0,98%	14,56
total	100,00%	14149,20	100,00%	1485,27

Tabla 16: Composición de las escorias y las cenizas volantes

Gracias a este análisis en la composición de las escorias se puede ver muy claramente que la materia de las cenizas está formada por los elementos minoritarios presentes en los RSU.

composición minoritarios (mg/kg)	
Al	4505,6
Ca	313781,4
Fe	393178,4
K	14505,6
Mg	15146,4
Mn	428,3
Na	1935386,0
P	9457,6
S	22459,7
Cu	1231,7
Mo	30,0
Ti	11928,5
Ni	188,0
Si	178498,5

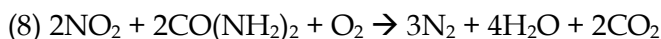
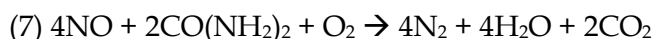
Tabla 17: Composición de los elementos minoritarios de losRSU

III. Desarrollo proyecto

III.4.1.5 Cálculo de reactivos para el tratamiento de los gases de salida

Existen una serie de reactivos muy útiles para el tratamiento de los gases de combustión procedentes de los hornos. Basándonos en los datos de este proyecto se va a elaborar un análisis para la obtención de la cantidad de urea necesaria para tratar los NO_x, la cantidad de la cal para la eliminación de elementos ácidos como el SO₂ y el HCl y el carbón activado necesario para la adsorción de posibles contaminantes presentes como el Hg o el Cd.

El uso de la urea (CO(NH₂)₂) para el tratamiento de los NO_x es un proceso ya establecido en el mundo de la incineración de residuos, para poder conocer el caudal necesario para el tratamiento de los gases de combustión procedentes de esta planta, hay que basarse en las reacciones entre la urea y los NO_x.



Al proceso de eliminación de NO_x mediante urea se le aplicará un rendimiento del 70%, y un valor de 1,25 de exceso de urea. Ambos valores vienen relacionados, se ha decidido aplicar el 70% de la eficacia ya que es el valor medio que le da la empresa especializada en el tratamiento de gases de combustión por RNCS (Reducción Selectiva No Catalítica), Babcock & Wilcox.

La composición de los gases de combustión antes de ser tratados es la obtenida en el III.4.1.3 Determinación del exceso de aire, partiendo de esta y sabiendo el exceso de urea a utilizar se puede obtener el flujo de urea que se necesita.

$$Urea \left(\frac{kg}{hora} \right) = NO \left(\frac{kg}{hora} \right) \cdot 1,25 + NO_2 \left(\frac{kg}{hora} \right) \cdot 1,25$$

Como se sabe que el rendimiento para la eliminación de los gases NO_x es del 70%, para conocer la cantidad de NO y NO₂ final, bastará simplemente con aplicar este 70% a las concentraciones iniciales de ambos gases.

III. Desarrollo proyecto

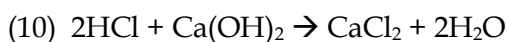
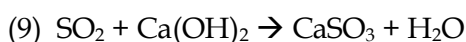
Mientras que, para la obtención del flujo másico del resto de los gases, una vez aplicada la urea, se deberá realizar un cálculo estequiométrico. En la *Tabla 18* se muestra los flujos de los gases antes y después de ser tratados con la urea.

a la salida de combustión (antes de tratar con urea)		después de tratar
GASES	kg/hora	kg/hora
NO	26,24	7,873
NO ₂	1,38	0,414
CO(NH ₂) ₂	34,53	9,844
O ₂	7525,44	7522,182
N ₂	89259,05	89271,923
H ₂ O	492,95	509,777
CO ₂	19277,68	19298,246

Tabla 18: Flujo de los gases de combustión antes y después de tratar con urea

Si se multiplican los 9,844 kg/hora de urea por las 8000 horas al año que el sistema está operativo se obtendrá que para hacer funcionar el sistema se necesitan 78753 kg de urea al año.

Otros de los gases contaminantes a abatir son el HCl y el SO₂, para estos dos gases se va a utilizar cal hidratada Ca(OH)₂, cuya reacción es la siguiente:



Al igual que en el uso de urea para la eliminación de los NO_x, la misma empresa Babcock & Wilcox afirma que la técnica de aplicación de cal hidratada para la eliminación de estos dos gases suele tener una eficiencia de entre el 90 y el 98%, en este caso se tomará el valor de 95%. Además, hay que tener en cuenta que la cal se introduce en exceso, según el documento BREF este exceso estequiométrico suele ser de 2, pero en este caso será reducido a la unidad, ya que no es necesario un valor más alto.

III. Desarrollo proyecto

Los gases a tratar serán los resultantes del proceso de combustión, los calculados en el punto III.4.1.4 Gases de combustión. Al igual que en la obtención de la cantidad de urea, para saber qué cantidad de Ca(OH₂) se necesita habrá que multiplicar el exceso de cal por los kg/hora de HCl que salen del horno y sumarlo al exceso de cal por los kg/hora de SO₂.

a la salida de combustión (antes de tratar con cal)		después de tratar
GASES	kg/hora	kg/hora
HCL	20,31	1,02
SO2	25,14	1,26
Ca(OH2)	45,46	37,00
CASO3	-	47,21
CACl2	-	30,64
H2O	492,95	526,88

Tabla 19: Flujo de los gases de combustión antes y después de tratar con la cal hidratada

Una vez aplicada la cal hidratada se puede ver como la cantidad de ácido clorhídrico y dióxido de azufre ha disminuido en gran medida. Seguidamente se muestra la fórmula que se ha utilizado para el cálculo de esta cantidad final, el procedimiento es el mismo tanto para ambos componentes.

$$HCl \text{ final } \left(\frac{kg}{hora} \right) = HCl \text{ inicial } \left(\frac{kg}{hora} \right) - \left(HCl \text{ inicial } \left(\frac{kg}{hora} \right) \cdot 95\% \text{ (rendimiento)} \right)$$

Pasando los 37 kg/hora a kg/año, se podrá conocer que la cantidad anual de cal hidratada requerida es de 295998,19 kg.

Para la obtención de los gases restantes que aparecen en la *Tabla 19* se aplicará un cálculo estequiométrico a los valores iniciales.

Finalmente, se hace un pequeño cálculo para la obtención del carbón activo necesario para la adsorción de posibles contaminantes presentes en los gases de salida. Para que el carbón activado sea capaz de cumplir con su función se requieren unos 3,5kg de este por cada tonelada de residuo, así que para saber la cantidad total de carbón activo

III. Desarrollo proyecto

que se necesitan, simplemente se multiplicaran estos 3,5 por las toneladas de residuo anuales que recibe la planta incineradora, en total 171.002 kg al año.

III.4.2 Balances de Energía

Uno de los principales objetivos de este proyecto es el de la creación de energía a partir de los procesos de combustión que suceden en el horno. En este capítulo se van a especificar los cálculos realizados para la obtención de toda la energía que forma parte del proceso, tanto la generada por el combustible y el metano, como las posibles pérdidas.

III.4.2.1 Energía generada

La energía generada en el proceso de combustión es la suma de la energía procedente de la combustión de los residuos, la energía aportada por el aire y la energía procedente del gas metano.

Para el cálculo de la energía procedente de los residuos se debe conocer el poder calorífico inferior de los residuos sólidos urbanos y la cantidad de RSU (kg) que entran por hora al horno.

$$E_{comb} \left(\frac{MJ}{año} \right) = PCI \left(\frac{MJ}{año} \right) \cdot RSU \text{ introducidos} \left(\frac{kg}{hora} \right) \cdot \text{tiempo en funcionamiento} (horas)$$

Sabiendo que,

$$PCI = 15,65 \frac{MJ}{kg}$$

$$RSU \text{ introducidos} = 6107,22 \text{ kg/h}$$

$$\text{Tiempo en funcionamiento del horno} = 8000 \frac{horas}{año}$$

Se puede concluir que la energía aportada por el combustible (residuos) es de 764623363,07 MJ al año o 764623,36 GJ/año.

III. Desarrollo proyecto

Seguidamente, se calculará la energía generada por el aire introducido en el interior del horno mediante el flujo F3. Para ello se deberá recurrir a la entalpía del aire húmedo a 150°C, ya que el cálculo es de la forma:

$$E_{aire} \left(\frac{MJ}{año} \right) = h_{aire\ húmedo\ a\ 150^{\circ}C} \left(\frac{kJ}{kg} \right) \cdot Aire\ real\ necesario \left(\frac{kg}{año} \right)$$

Siendo la entalpía del aire húmedo equivalente a 337,39 kJ/kg, la energía final suministrada por el aire será de 304.963 GJ/año. Aunque los cálculos anteriores dan el valor en MJ, este se multiplica por 10⁻⁶ para convertirlo en un valor más manejable.

Finalmente, se obtiene la energía aportada por el gas metano, necesario para que el proceso de combustión se realice adecuadamente.

Según el documento BREF se necesitan 10 m³ de gas para incinerar una tonelada de residuos, conociendo este valor y el del poder calorífico inferior del CH₄ se puede realizar el siguiente cálculo:

$$E_{gas\ metano} \left(\frac{MJ}{año} \right) = 10 \frac{m^3}{ton.\ de\ residuo} \cdot RSU\ introducidos \left(\frac{ton}{año} \right) \cdot PCI_{combustible} \left(\frac{GJ}{año} \right)$$

Siendo la energía aportada por el gas metano 18565,93 GJ/año, se puede concluir que la suma de las tres fuentes de energía da un total de 1088152,4 GJ.

III.4.2.1 Pérdidas de energía

Como se menciona al inicio del capítulo no solo hay generación de energía, sino que en los procesos de combustión de RSU también existen una serie de pérdidas importantes. Estas se van a dividir en dos grupos, perdidas de calor en gases de combustión y perdidas de calor en cenizas y escorias.

Los gases de combustión por lo que se produce la pérdida de calor son el CO, CO₂, H₂O, N₂, SO₂, O₂ y HCl. La pérdida de dicha energía se ha obtenido a partir de la siguiente fórmula:

III. Desarrollo proyecto

$$E_{gas} \left(\frac{GJ}{año} \right) = \left(C_{p_{gas}} \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \cdot (T_{salida\ gas} (k) - T_{ambiente} (k)) \cdot Masa_{gas} \left(\frac{kg}{año} \right) \right) \cdot 10^{-6}$$

Sabiendo que,

$$T_{salida\ gas} = 180^{\circ}C = 453^{\circ}K$$

$$T_{ambiente} = 25^{\circ}C = 293^{\circ}K$$

La temperatura de salida del gas no es un valor elegido al azar, se le da un valor de 180°C ya que según el documento BREF sobre Mejores Técnicas Disponibles, si los niveles de temperatura se encuentran por debajo de los 180° C el riesgo de corrosión aumenta, ya que se acerca al punto de rocío de diversos ácidos. Por esta razón y porque trabajando a temperaturas inferiores a los 200°C se evita la formación de dioxinas y furanos, el valor final elegido es el de 180°C.

En la *Tabla 20* se puede observar la energía desprendida por cada compuesto, asimismo sumando todos estos valores se puede observar también que la energía total que se pierde por los gases de combustión es de 145.920,8 GJ/año.

GASES	Cp (kJ/kg·K)	kg/h	kg/año	GJ/año
CO	1,05	554,5	4435717,6	721,9
CO2	0,85	19277,7	154221441,7	20318,7
H2O	1,87	493,0	3943606,3	1143,1
N2	1,04	89259,0	714072366,0	115108,5
SO2	0,6	25,1	201149,3	18,7
HCl	0,99	20,3	162510,4	24,9
O2	0,92	7525,4	60203527,4	8585,0
			TOTAL	145920,8

Tabla 20 : Energía desprendida por los gases de combustión

La otra parte de las pérdidas se realiza a través de las escorias y las cenizas volantes, ambas formadas por los compuestos (*comp.*): SiO₂, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃, MgO, K₂O, Na₂O, SO₃, TiO₂, P₂O₅ y otros metales.

Los cálculos realizados han sido:

III. Desarrollo proyecto

- **Escorias**

$$E_{comp.} \left(\frac{KJ}{año} \right) = \left(Cp_{comp.} \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \cdot (T_{salida\ escoria} (k) - T_{ambiente} (k)) \cdot Masa_{comp.} \left(\frac{kg}{año} \right) \right)$$

$$E_{comp.} \left(\frac{GJ}{año} \right) = E_{comp.} \left(\frac{KJ}{año} \right) \cdot 10^{-6}$$

- **Cenizas volantes**

$$E_{comp.} \left(\frac{KJ}{año} \right) = \left(Cp_{comp.} \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right) \cdot (T_{salida\ cenizas} - T_{ambiente} (k)) \cdot Masa_{comp.} \left(\frac{kg}{año} \right) \right)$$

$$E_{comp.} \left(\frac{GJ}{año} \right) = E_{comp.} \left(\frac{KJ}{año} \right) \cdot 10^{-6}$$

Sabiendo que,

$$T_{salida\ escorias} = 750^{\circ}C = 1023^{\circ}K$$

$$T_{salida\ cenizas} = 180^{\circ}C = 453^{\circ}K$$

Se adquiere un valor de temperatura de salida de las escorias de 750°C ya que los porcentajes mostrados en la *Tabla 16* son tomados a esta temperatura, como esta cantidad se utiliza para la estimación de las pérdidas de las escorias, la temperatura adoptada ha sido la misma. A diferencia de las cenizas volantes, cuya temperatura de salida es la misma que la de los gases de combustión de salida. La temperatura ambiente no ha variado, 25°C.

En la *Tabla 21* se observa la energía desprendida tanto por las cenizas volantes como por las escorias. Obteniendo unos valores de 6787,5 GJ/año perdido a través de las escorias, y 159,1 GJ/año a través de las cenizas volantes.

III. Desarrollo proyecto

CENIZAS VOLANTES Y ESCORIAS	Cp (kJ/kg·K)	kg/año escoria	Energía escorias (GJ/año)	kg/año cenizas volantes	Energía cenizas volantes (GJ/año)
SiO ₂	0,75	2408193,25	1300,9	390775,79	45,1
Al ₂ O ₃	0,78	1014497,39	571,9	114217,63	13,8
CaO	0,75	4875813,13	2661,4	426273,86	49,7
Fe ₂ O ₃	0,65	348070,24	164,7	89413,54	9,0
MgO	0,92	370708,95	247,9	34309,85	4,9
K ₂ O	0,89	745662,66	481,7	39211,25	5,4
Na ₂ O	1,12	80650,42	65,3	114514,69	19,8
SO ₃	0,63	1102222,41	506,9	59410,99	5,8
P ₂ O ₅	0,30	280154,09	60,1	46489,10	2,1
TiO ₂	0,69	254685,54	128,2	22427,65	2,4
otros/metales	0,39	2116719,80	598,5	14555,69	0,9
			6787,5		159,1

Tabla 21: Energía desprendida a través de las escorias y las cenizas volantes

III.4.2.1 Balances de Energía

Llegados a este punto, ya se podrán calcular los rendimientos de la combustión, de la caldera y del vapor generado; están escritos en este orden ya que se necesita el primero para calcular el segundo, y el segundo para el cálculo del tercero. En esta parte del capítulo se mostrarán todos los pasos a seguir para la obtención de la energía total producida.

Para el rendimiento de combustión se ha seguido la siguiente ecuación:

$$\eta_{comb} = \frac{(E_{comb} + E_{aire} + E_{gas\ metano}) - (E_{escoria} + E_{cenizas} + E_{gases\ comb})}{(E_{comb} + E_{aire} + E_{gas\ metano})}$$

Siendo conocidas todas las partes de la ecuación, se obtiene un rendimiento de la combustión del 86%.

III. Desarrollo proyecto

En segundo lugar, se obtendrá la eficiencia de la caldera cuyo cálculo es el siguiente:

$$\eta_{caldera} = \eta_{comb} \cdot \eta_{t\acute{e}rmica} \cdot \eta_{ineficiencias}$$

Sabiendo que,

$$\eta_{ineficiencias} = 0,97$$

$$\eta_{t\acute{e}rmica} = 0,93$$

Aquí aparecen dos términos nuevos, el rendimiento térmico y las pérdidas por radiación, cenizas y agua de la caldera. Por lo que respecta al rendimiento térmico, se le da valor de 93% ya que es el valor medio que proporciona el fabricante de calderas B&W. Por otra parte, el término $\eta_{ineficiencias}$ hace referencia a las pérdidas debido a cenizas, radiación y agua de caldera, según el apéndice 10.4 del documento BREF estas pérdidas suponen un 3%, por lo $\eta_{ineficiencias}$ será el 97% restante.

Finalmente se puede concluir que el rendimiento de la caldera es de un 78%.

El último rendimiento que calcular será el de vapor:

$$\eta_{vapor} = \eta_{caldera} \cdot \eta_{interno}$$

Sabiendo que,

$$\eta_{interno} = 0,90$$

El 10% de la energía se suele consumir internamente, dejando así un 90% útil para producir vapor, este 90% corresponderá al $\eta_{interno}$.

Conocido el valor del rendimiento interno se procederá al cálculo de la energía de vapor.

$$E_{vapor} \left(\frac{GJ}{a\tilde{n}o} \right) = (E_{comb} + E_{aire} + E_{gas\ metano}) \left(\frac{GJ}{a\tilde{n}o} \right) \cdot \eta_{vapor}$$

III. Desarrollo proyecto

Una vez realizados estos dos últimos cálculos se sabe que el η_{vapor} es del 70%, y la energía de 759348,55 GJ/año. Con el valor de esta energía se puede calcular la cantidad de vapor que se genera.

$$M_{vapor} \left(\frac{ton}{año} \right) = \frac{E_{vapor} \left(\frac{GJ}{año} \right)}{h_{450^{\circ}C, 50bar} \left(\frac{GJ}{ton} \right) - h_{150^{\circ}C, 50bar} \left(\frac{GJ}{ton} \right)}$$

Sabiendo que,

$$h_{450^{\circ}C, 50bar} = 3,35 \left(\frac{GJ}{ton} \right)$$

$$h_{150^{\circ}C, 50bar} = 0,55 \left(\frac{GJ}{ton} \right)$$

Los parámetros de vapor se vuelven a obtener a través de la empresa proveedora B&W. Aunque ellos proporcionan un rango de operación, los valores escogidos en este trabajo se encuentran en la media de dicho rango.

Finalmente se realiza el cálculo de la potencia eléctrica que puede producir la planta, para esto se adopta un valor de eficiencia eléctrica del 25%, como se ha procedido en los casos anteriores, este es un valor medio dentro del rango que ofrece la empresa B&W. Esta eficiencia eléctrica no es más que la capacidad que tiene la planta de convertir el vapor en energía eléctrica.

$$E_{eléctrica} \left(\frac{GJ}{año} \right) = E_{vapor} \left(\frac{GJ}{año} \right) \cdot \eta_{eléctrica}$$

Conociendo que,

$$\eta_{eléctrica} = 25\%$$

Gracias a toda esta serie de cálculos se puede concluir que el flujo de vapor producido por la planta será de 271195,91 toneladas al año, y la energía eléctrica que la planta será capaz de producir de 189837,14 GJ al año, equivalente a 6,59 MW.

III. Desarrollo proyecto

Dividiendo los GJ/año por las toneladas/año de residuo que entran a la planta, se llega a la conclusión de que por cada tonelada de residuo que entra a la planta se crean 3,89 GJ.

III. Desarrollo proyecto

III.4 Estudio Económico

En este capítulo se realiza un análisis económico del proyecto, se analizan todos los costes que intervienen tanto en la creación de la planta como en su puesta en marcha y posterior funcionamiento. El estudio se dividirá en tres partes, la primera, los costes del sistema incinerador, aquí se incluye toda la tecnología y maquinaria que hacemos servir para la creación de la planta incineradora, el horno de parrilla, los reactivos, etc. Seguidamente se introducirían los costes de capital directos o inversión total; y finalmente, los costes anuales de operación y mantenimiento.

A nuestra planta entrarían alrededor de 48.857,72 toneladas de residuos al año, para la realización de los costes se ha adaptado a 49.000 toneladas anuales.

III.4.1 Costes del sistema incinerador y de la tecnología de la planta

Para realizar el apartado de costes se debe tener claro que la parte donde más capital se va a invertir es en la maquinaria y tecnología de la planta incineradora, este tipo de sistemas no son baratos debido a su complejidad y peligrosidad.

El documento BREF sobre Mejores Técnicas Disponibles, muestra un análisis comparativo entre los costes de inversión del sistema incinerador de una planta y la cantidad de toneladas que se traten en ella. Es decir, por cada tonelada cuánto capital se deberá invertir en los sistemas incineradores.

En la *Tabla 22* se muestra esta comparativa, basada en varios estudios, y que el mismo documento proporciona.

Toneladas de residuos	25.000	100.000	200.000	300.000
Costes inversión (EUR)	1.150.000	4.600.000	7.500.000	10.000.000

Tabla 22: Toneladas de residuos frente a costes de inversión

III. Desarrollo proyecto

A partir de estos datos se crea una línea de regresión donde las toneladas de residuos será el eje de abscisas (x), y los costes de inversión el eje de las ordenadas (y), y se obtiene la ecuación polinómica.

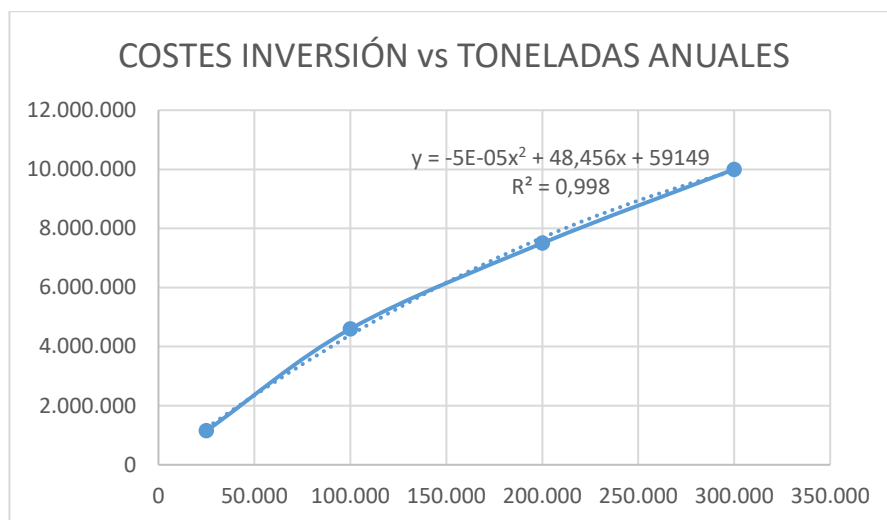


Ilustración 27: Toneladas de residuos frente a costes de inversión

A continuación, una vez obtenida esta ecuación polinómica, se sustituye la x por las toneladas anuales que recibe nuestra planta y se obtiene los costes de inversión del sistema incinerador y la caldera.

$$y = -5E - 05x^2 + 48,456x + 59149$$

Sabiendo que,

$$x = 49.000 \text{ toneladas/año}$$

Realizando esta operación se llega a la conclusión que se necesita invertir 2.313.443 € en tecnología de incineración.

Dentro de este mismo subapartado se incluyen también los costes de los reactivos y del gas natural.

En el caso de los reactivos, siendo conocido el coste por tonelada de cada uno de ellos, simplemente habrá que multiplicarlo por la cantidad total que se necesita, y

III. Desarrollo proyecto

finalmente sumar cada una de estas cantidades para obtener el coste total de los reactivos, que serán unos 155.857 €. La *Tabla 23* muestra de manera muy clara cada uno de estos valores:

coste reactivos	€/tn	Kg/año	Total coste EUR/año
Carbón activo	500	171500	85750,0
Urea usada	50	78982,55	3949,1
Cal apagada o hidratada	100	661578,88	66157,9
TOTAL			155.857

Tabla 23: Costes reactivos

El mismo procedimiento se le aplica al cálculo del gas natural (CH_4), multiplicando los kWh/m³ por los €/kWh y por los m³ anuales que se necesitan, se obtiene el coste total del gas natural, 343.980 €.

coste gas natural	
kWh/m³	11,7
€/kWh	0,06
m³ a utilizar por año	490000
TOTAL	343.980

Tabla 24: Costes gas natural

III.4.2 Costes de capital o Inversión total

Los costes de capital lo forman los costes directos y los indirectos. Mientras que los costes directos se asocian directamente al producto terminado o a la elaboración de este, los indirectos no se pueden aplicar a un producto específico. Por ejemplo, los costes directos de este proyecto serían los edificios, las instalaciones y los equipos auxiliares, los sistemas eléctricos, etc. Mientras que los indirectos lo formarían la ingeniería, el desarrollo y los costes financieros del proyecto.

Esta parte del estudio económico se explicará a partir de la siguiente tabla.

III. Desarrollo proyecto

Como se puede comprobar en la *Tabla 25* hay tres columnas, la primera es la de los ítems en los que se va a invertir; la segunda, el precio final de cada uno de ellos; y la tercera y última el porcentaje que forma del total el coste de cada uno de estos ítems. Es decir, qué cantidad del precio total se invierte en cada uno de los apartados. La suma de todos los porcentajes debe dar 100. Así que, si a la preparación del terreno se le da un 1,50%, para obtener el coste de este se deberá multiplicar la inversión total por 0,015, y así con todos los ítems.

Costes de capital directos (Construcción)		
ítem	€	%
Preparación del terreno, accesos, parking,...	63.672,74 €	1,50%
Captación de agua	21.224,25 €	0,50%
Pretratamiento	84.896,99 €	2,00%
Equipos para el Sistema de Incineración	2.313.443,00 €	54,50%
Postratamiento Gases	169.793,98 €	4,00%
Gestión de Concentrados (cenizas)	127.345,49 €	3,00%
Gestión de residuos (escorias)	127.345,49 €	3,00%
Sistemas Eléctricos e Instrumentación	212.242,48 €	5,00%
Instalaciones y equipos auxiliares	84.896,99 €	2,00%
Edificios	424.484,95 €	10,00%
Puesta en marcha y pruebas de aceptación	42.448,50 €	1,00%
<i>Subtotal de costes directos (construcción)</i>	3.671.794,85 €	86,5%
Costes de capital indirectos (Construcción)		
Costes de Ingeniería del proyecto		
Ingeniería Preliminar	63.672,74 €	1,50%
Ensayos piloto	21.224,25 €	0,50%
Diseño de detalle	21.224,25 €	0,50%
Gestión y supervisión de la construcción	63.672,74 €	1,50%
Subtotal-servicios de ingeniería.	169.793,98 €	4,00%
Desarrollo del Proyecto		
Administración, contratación y gestión	63.672,74 €	1,50%
Permisos ambientales	42.448,50 €	1,00%
Servicios Legales	21.224,25 €	0,50%
Subtotal Desarrollo del proyecto.	127.345,49 €	3,00%

III. Desarrollo proyecto

Costes financieros del proyecto

Intereses durante la construcción	84.896,99 €	2,00%
Fondo de Reserva para el servicio de la deuda	63.672,74 €	1,50%
Otros costes financieros	42.448,50 €	1,00%
Subtotal-financiación del proyecto	191.018,23 €	4,50%
Contingencias	84.896,99 €	2,00%
Subtotal costes indirectos del capital	573.054,7 €	2,0%
Costes totales de capital	4.244.849,54 €	100,00%

Tabla 25: Costes de capital directos e indirectos

La casilla de color morado hace referencia a la inversión del sistema de incineración, obtenido en el subapartado anterior, ha sido gracias a partir de esta que se han podido obtener el resto de los costes. El porcentaje asignado a cada uno de los ítems es un valor que, basándose en varios estudios sobre plantas incineradoras, se le ha dado adaptándose a las características de nuestra planta.

La inversión total será de 4.244.849 €, siendo el beneficio de la energía que se produce anualmente de 594.968,61 € se puede comprobar que la finalidad de la planta no es amortizar la inversión total con este beneficio, sino poder lo más autosuficiente posible.

III.4.3 Costes anuales de operación y mantenimiento

Los costes anuales de operación y mantenimiento hacen referencia a lo que costaría la puesta en marcha y el mantenimiento de la planta.

Al igual que en el cálculo de la inversión total los costes se van a dividir en variables y fijos. La forma de proceder de la siguiente tabla, la *Tabla 26*, es la misma que la anterior. De cada ítem se mostrará el dinero anual que se debe invertir en él, lo que cuesta cada uno de los ítems por tonelada de residuo, y finalmente, que porcentaje del total conforma cada apartado.

El porcentaje que se le quiera asignar a cada uno de los productos o servicios es un valor que se adapta a cada proyecto, y variará según la complejidad de este, pero

III. Desarrollo proyecto

estos valores se encuentran dentro de unos rangos establecidos por el documento BREF sobre Mejores Técnicas Disponibles. Por lo tanto, conociendo las características propias de cada proyecto, su nivel de complejidad y el rango de porcentajes en el que se suele mover cada ítem, se le podrá asignar un porcentaje adecuado a cada uno de los costes.

	€	€/ton	% del Total
Costes Variables			
Energía (Gas Natural)	343.980,00 €	7,02 €	35,00%
Productos químicos (cal, urea, carbón)	155.857,02 €	3,18 €	4,00%
Total costes energéticos	499.837,02 €	10,20 €	39,00%
Reemplazamiento filtros y otros sistemas limpieza	44.985,33 €	0,92 €	9,00%
Gestión de las escorias	14.995,11 €	0,31 €	3,00%
Total costes variables	559.817,46 €	11,42 €	51,00%
Costes Fijos			
Termino de potencia	14.995,11 €	0,31 €	3,00%
Personal	139.954,36 €	2,86 €	28,00%
Mantenimiento	54.982,07 €	1,12 €	11,00%
Vigilancia ambiental	9.996,74 €	0,20 €	2,00%
Costes indirectos	24.991,85 €	0,51 €	5,00%
Total costes fijos	244.920,14 €	5,00 €	49,00%
			100,00%
	€	€/ton	
Total costes	804.737,59 €	16,42 €	

Tabla 26: Costes anuales de operación y mantenimiento

Tanto el coste del gas natural como el de los reactivos se ha obtenido anteriormente, y es a partir de estos dos que se obtendrán todos los demás, es decir, que los costes anuales de operación y mantenimiento están calculados en función del gas y los reactivos necesarios para un año. Por lo que, si al personal se le asigna un 28%, la cantidad de euros invertida estará calculada como el 28% de los 499.837,02 € de costes energéticos, y así sucesivamente.

III. Desarrollo proyecto

Realizada la suma de los costes fijos y los variables se obtiene que la planta incineradora de este proyecto costará unos 804.737,59 € anuales, sin contar la inversión inicial realizada. De una forma más clara, tratar una tonelada de residuos en la planta costaría alrededor de unos 16,42 €.

IV. CONCLUSIONES
CONCLUSIONES

IV. Conclusiones

Una vez se ha dado por finalizado el diseño de la planta incineradora de residuos sólidos urbanos para las comarcas de l'Alcoià y el Comtat se ha llegado a una serie de conclusiones las cuales van a ser analizadas en este capítulo.

Para el correcto diseño de una planta incineradora de RSU se puede tomar como referencia el documento BREF, a lo largo de este estudio ha sido nombrado una infinidad de veces, y es que forma una guía muy completa y detallada sobre el funcionamiento y las diferentes técnicas disponibles en los procesos de incineración de residuos. Sirviendo de gran ayuda a la hora de elegir las técnicas y tecnologías que mejor se adaptaban a nuestra planta y sirviendo de apoyo no solo para el apartado de los cálculos sino para el estudio económico. Es una gran fuente de información, y la base principal de este proyecto.

Para una alimentación de 49.000 toneladas de residuos al año se ha optado por una tecnología de horno de parrilla para poder llevar a cabo los procesos de combustión. Esta tecnología aparte de ser una de las más utilizadas en el sector, ofrece un alto rendimiento y versatilidad. En cuanto a los sistemas de tratamiento de los gases de combustión, se ha optado por un sistema cuyo gasto energético sea lo mínimo posible, sin olvidar claro está su eficiencia, se deben cumplir siempre los niveles de emisiones establecidos por ley. Por ello se ha optado por un precipitador electrostático para la eliminación de partículas, un sistema RNCS para la eliminación de los NOx y una técnica de absorción semihúmeda para la reducción de los gases ácidos.

Uno de los objetivos principales de esta planta no era el de obtener beneficio de la energía generada por la combustión de los residuos, sino el de poder hacer la planta lo más autosuficiente posible. La energía generada nunca superará la suministrada, pero en este caso los 6591,6 MW que se forman son más que suficiente para hacer funcionar el horno de combustión de la planta, siendo esta parte de la instalación una de las que más energía consume, se puede concluir que la planta sí ha cumplido con un importante objetivo, el de poder convertir la quema de residuos en una de sus fuentes de energía.

El apartado de costes también ha sido satisfactorio, teniendo en cuenta que es una planta de pequeñas dimensiones, normalmente las plantas incineradoras suelen

IV. Conclusiones

tratar una mayor cantidad de residuos, los resultados se ajustan mucho a los costes de otras plantas similares en funcionamiento.

El hecho de que el apartado de costes sea satisfactorio no significa que la planta sea rentable, como se ha podido comprobar en este proyecto no lo es, la inversión total y los costes de operación y mantenimiento no se amortizan con los MW que se generan. Según este estudio el coste de tratamiento de una tonelada de residuos en nuestra planta incineradora es de 16,42 €. Pero que no sea rentable económicamente no significa que no sea rentable de forma social y medioambiental. A largo plazo se pueden amortizar todos estos gastos ya que no será necesario invertir más capital en solucionar el problema de la acumulación de deshechos.

Llegados a este punto se puede admitir que la incineración de residuos será el trampolín hacia una economía circular. A pesar de todas las polémicas que levanta, es la mejor alternativa a los vertederos, la más rentable y la que más se ajusta a los tiempos. Es necesario acabar con las toneladas de residuos que se generan anualmente en el mundo y en este proyecto se estudia una de las mejores alternativas para hacerlo.

V. APÉNDICES
APÉNDICES

V.1. REFERENCIAS

PUBLICACIONES:

1. Santiago López Camacho. (2018). Planta de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos a partir de una Tecnología de Parrila (Trabajo de fin de Máster). Universidad de Sevilla, Sevilla.
2. Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA), Programa Medioambiental de las Naciones Unidas (UNEP), «Global Management Waste Outlook (GWMO),» 2015.
3. A. R. Salvador, «La Incineración de Residuos ¿Está justificado el rechazo social?,» Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Esp), vol. 104, nº 1, pp. 175-187, 2010.
4. Rodríguez, J. F., Alarcón, U. F., García Bedoya, O. y Benavides, G. (2017). «Diseño y prototipo de un precipitador electrostático». Mutis, 7(2), 86-95, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1237>
5. International Solid Waste Association (ISWA), «Annual Review,» 2017.
6. European Commission, The role of waste-to-energy in the circular economy, 2017.
7. V. N. Vishal Soni, «Gasification – A Process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Waste,» American Journal of Modern Energy, vol. 2, nº 6, pp. 38-42, 2016.
8. ISWA, Waste to Energy in Low and Medium Income Countries, 2013.
9. BBC News, «"Crisis mundial de la basura": 3 cifras impactantes sobre el rol de Estados Unidos», 8 de julio del 2019. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-48914734>
10. Greenpeace, «La incineración de residuos en cifras,» Julio 2010.

V. Apéndices

LEYES Y NORMATIVAS:

1. Parlamento Europeo, Consejo de la UE, «Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas».
2. «BOE» núm. 164, de 10 de julio de 2013, RD 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes, España, p. 51119 a 51207.
3. European Commission, «TWG Comments on Draft 1 of Waste Incineration BREF,» 2003.
4. European Commission, «The EU environmental implementation review country report- Spain. SWD(2017) 42 final,» Bruselas, 2017.

PÁGINAS WEB Y OTROS:

1. B&W Volund, «Sundsvall Energi, Sweden,» [En línea]. Disponible: http://www.volund.dk/~media/Downloads/Brochures_-_WTE/Korstaverket_-_Sundsvall_-_Sweden.pdf.
2. Babcock & Wilcox, «Selective Catalytic Reduction Technology,» 2012. [En línea]. Disponible: <https://www.babcock.com/en/products/-/media/71de7a4201224137839534ba28fc1f28.ashx>.
3. GEA, «Niro Spray Drying Absorption»[En línea] Disponible: https://www.gea.com/es/binaries/flue-gas-cleaning-spray-power-plants-gea_tcm25-34871.pdf
4. Valmet, «Air Emission Control, nox-reduction» [En línea]
Disponible: <https://www.valmet.com/energyproduction/air-emission-control/nox-reduction/>

V. Apéndices

5. Objetivos de Desarrollo Sostenible, [En línea] Disponible:

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>

6. Recytrans, «Jerarquía de Residuos» [En línea]

Disponible: <https://www.recytrans.com/blog/jerarquia-de-residuos/>

7. Recíclame «Incineración» [En línea] Disponible: [http://www.reciclame.info/gestion-de-residuos-](http://www.reciclame.info/gestion-de-residuos-2/incineracion/#:~:text=La%20incineraci%C3%B3n%20es%20una%20t%C3%A9cnica,calor%20que%20se%20puede%20aprovechar.)

[2/incineracion/#:~:text=La%20incineraci%C3%B3n%20es%20una%20t%C3%A9cnica,calor%20que%20se%20puede%20aprovechar.](http://www.reciclame.info/gestion-de-residuos-2/incineracion/#:~:text=La%20incineraci%C3%B3n%20es%20una%20t%C3%A9cnica,calor%20que%20se%20puede%20aprovechar.)

8. Power Technology, «Amager Bakke Waste-to-Energy Plant,» [En línea].

Disponible: <https://www.power-technology.com/projects/amager-bakke-waste-energy-plant/>.

V. Apéndices
